

ETABLIERUNG EINES STANDARDISIERTEN
UNTERSUCHUNGSVERFAHRENS ZUR SONOGRAPHISCHEN DARSTELLUNG
UND BEURTEILUNG DES SCAPHOLUNÄREN BANDES /
LIGAMENTUM SCAPHOLUNATUM

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades

doctor medicinae (Dr. med.)

**vorgelegt dem Rat der Medizinischen Fakultät
der Friedrich-Schiller-Universität Jena**

von Tino Handschak

geboren am 22.11.1990 in Berlin

Gutachter

1. Prof. Dr. med. habil. Frank Siemers, BG Klinikum Bergmannstrost Halle
2. PD Dr. med. habil. Mark Lenz, Universitätsklinikum Jena
3. Prof. Dr. med. habil. Michael Schädel-Höpfner, Rheinland Klinikum Neuss
Lukaskrankenhaus

Tag der öffentlichen Verteidigung: 01.10.2019

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abkürzungsverzeichnis	VI
1. Zusammenfassung.....	1
2. Einleitung	3
2.1. Anatomie des Handgelenks	4
2.1.1 Knochen und Gelenke.....	4
2.1.2 Bandsystem der Hand.....	6
2.1.3 Scapholunäres Band.....	6
2.1.4 Carpale Kinematik.....	8
2.1.5 Bedeutung des SL-Bandes	10
2.2. Die scapholunäre Bandläsion / Dissoziation	11
2.2.1 Begriffsdefinitionen.....	11
2.2.2 Epidemiologie	12
2.2.3 Ätiologie	13
2.2.4 Klinische Symptomatik	13
2.2.5 Folge	14
2.3. Klassifikationen.....	15
2.3.1 Carpale Instabilität	15
2.3.2 Chronizität.....	16
2.3.3 Art der Instabilität	16
2.3.4 Stadieneinteilung der scapholunären Dissoziation (SLD)	17
2.3.5 Arthroskopische Stadieneinteilung	18
2.4. Diagnostik.....	19
2.4.1 Klinische Untersuchung	19

2.4.2 Projektionsradiographie	21
2.4.3 Stressaufnahmen	24
2.4.4 Kinematographie	25
2.4.5 Magnetresonanztomographie	25
2.4.6 Magnetresonanz-Arthrographie	25
2.4.7 Computertomographie	26
2.4.8 Arthroskopie	26
2.5. Therapeutische Optionen	26
2.5.1 Indikationen.....	26
2.5.2 Behandlungsalgorithmus.....	27
2.5.3 Frische scapholunäre Verletzung.....	28
2.5.4 Veraltete scapholunäre Verletzung	28
3. Ziele der Arbeit.....	30
4. Methodik.....	31
4.1. Hypothesen	31
4.2. Patienten und Probanden	33
4.3. Allgemeine Definitionen	36
4.4. Sonographie	36
4.4.1 Technische Grundlagen	36
4.4.2 Untersuchungsgerät.....	38
4.4.3 Standardisierter Untersuchungsablauf	39
4.4.4 Beurteilung Darstellbarkeit	42
4.4.5 Messmethode	43
4.4.6 Untersucher	44
4.5. Magnetresonanztomographie (MRT)	45
4.5.1 Technische Grundlagen	45

4.5.2 Gerät und Untersuchungsablauf	46
4.5.3 Auswertung	47
4.6. Arthroskopie	48
4.6.1 Technische Grundlagen	48
4.6.2 Untersuchungsablauf	48
4.6.3 Auswertung	49
4.7. Röntgen	49
4.7.1 Technische Grundlagen	49
4.7.2 Geräte	50
4.7.3 Untersuchungsablauf	50
4.7.4 Auswertung	51
4.8. Statistische Auswertung	52
4.8.1 Gruppeneinteilung	52
4.8.2 Verwendete Statistik	52
5. Ergebnisse	57
5.1. Darstellbarkeit.....	57
5.1.1 Hypothese 1 – bildmorphologisches Korrelat des SL-Bandes in der Sonographie.....	57
5.1.2 Hypothese 2 – Methodenvergleich.....	59
5.1.3 Hypothese 3 – Seitenvergleich Darstellbarkeit in der Sonographie	61
5.2. Abstand	62
5.2.1 Hypothese 4 – Methodenvergleich MRT und Sonographie.....	63
5.2.2 Hypothese 5 – Seitenvergleich Abstand in der Sonographie	65
5.2.3 Hypothese 6 – Abstände bei Komplettruptur und Teilruptur.....	68
5.3. Abstand Funktionsaufnahmen	69

5.3.1 Hypothese 7 – Physiologisches Abstandsverhalten.....	69
5.3.2 Hypothese 8 – Scapholunäre Dissoziation.....	70
5.4. Cut-off-Wert für Läsion	71
5.4.1 Hypothese 9	71
5.5. Sonographischer SL-Band-Score	74
6. Diskussion.....	77
6.1. Allgemeine Aspekte	77
6.2. Ergebnisbezogene Zusammenfassung und Beurteilung	78
6.2.1 Untersuchungsablauf	78
6.2.2 Darstellbarkeit	78
6.2.3 Abstand	81
6.2.4 Abstand Funktionsaufnahmen	84
6.2.5 Cut-off-Wert	84
6.2.6 Sonographischer SL-Band-Score	85
6.3. Stellenwert der Diagnostika	86
6.3.1 Klinische Untersuchung	86
6.3.2 Röntgen	86
6.3.3 Computertomographie	87
6.3.4 Magnetresonanztomographie	88
6.3.5 Sonographie.....	89
6.3.6 Zusammenfassung.....	90
6.4. Limitationen und methodische Einschränkungen	91
6.5. Ausblick	94
7. Schlussfolgerung.....	95
8. Literatur- und Quellenverzeichnis.....	97
9. Anhang.....	IV

Tabellen.....	IV
Patienteninformation und Einwilligungserklärung	VI
Ethikvotum.....	IX
Tabellenverzeichnis.....	X
Abbildungsverzeichnis.....	XII
Danksagung	XVI
Ehrenwörtliche Erklärung.....	XVII

Abkürzungsverzeichnis

a.p.	anteriorposterior
Art.	Articulatio
AUC	Area under the curve – Fläche unter der Kurve
CIA	carpal instability adaptive
CIC	carpal instability complex
CID	carpal instability dissociative
CIND	carpal instability nondissociative
CT	Computertomographie
d.p.	dorsopalmar
DISI	dorsal intercalated segment instability
EWAS	European Wrist Arthroscopy Society
FFE	Fast Field Echo
ICC	Intra-Class-Korrelationskoeffizient
K	Cohens-Kappa
KI	Konfidenzintervall
Lig.	Ligamentum
Ligg.	Ligamenta
LT-Band	Lunotriquetrales Band
M.	Musculus
Max.	Maximalwert
MCR-Portal	mediocarpal-radiales Portal
Min.	Minimalwert
mm	Millimeter
MRA	Magnetresonanarthrographie, auch Arthro-MRT
MRT	Magnetresonanztomographie
N	Newton (SI-Einheit)
p.a.	posterioranterior
p.d.	palmodorsal
PD	Protonendichte
PISI	palmar intercalated segment instability

Proc.	Processus
RD	Radialduktion
ROC	Receiver Operating Characteristic
SD	Standardabweichung
SLAC	scapholunate advanced collapse
SL-Band	Scapholunäres Band
SLD	Scapholunäre Dissoziation
SNAC	scaphoid nonunion advanced collapse
STIR	Short-Tau Inversion Recovery
T	Tesla (SI-Einheit)
TFCC	Trifibrocartilaginärer Complex
THI	Tissue Harmonic Imaging
TSE	Turbo-Spin-Echo
UD	Ulnarduktion
\tilde{x}	Median
\bar{x}	Mittelwert

1. Zusammenfassung

Das scapholunäre Band (SL-Band) besitzt eine zentrale Rolle als Stabilisator der Hand. Unerkannte Verletzungen können zu carpaler Instabilität, Schmerzen, Arthrose und Gebrauchsunfähigkeit der Hand führen. Wichtig ist daher eine adäquate und frühzeitige Diagnostik, um entsprechende therapeutische Maßnahmen einleiten zu können. Es existieren verschiedene diagnostische Verfahren, die eine SL-Bandverletzung direkt darstellen oder eine scapholunäre Dissoziation beziehungsweise carpale Instabilität nachweisen. Hierbei sind jedoch Nachteile wie Strahlenbelastung durch Röntgen und Computertomographie, Kosten und Verfügbarkeit für eine Magnetresonanztomographie (MRT) oder die Invasivität durch eine Arthroskopie zu beachten. Der Ultraschall als nahezu überall verfügbares, kostengünstiges und nicht invasives Verfahren ist in der SL-Banddiagnostik bislang noch nicht etabliert. Mehrere Studien und Untersuchungen erbrachten erste Erkenntnisse bezüglich der Darstellbarkeit und des scapholunären Abstands. Vielfach wurde ein positives Fazit gezogen und ein hohes Potential für die Sonographie eingeräumt. Eine Empfehlung zur standardmäßigen Anwendung in der klinischen Praxis existiert jedoch noch nicht. Ursächlich waren insbesondere Limitierungen zur Differenzierung einer Läsion.

Ziel dieser Arbeit war es, ein standardisiertes Untersuchungsverfahren für die Sonographie zur Darstellung und Kriterien zur Beurteilung des scapholunären Bandes zu entwickeln. Hierzu wurde im BG Klinikum Bergmannstrost im Zeitraum 2013 bis 2016 eine prospektive Studie durchgeführt. Im ersten Schritt erhielten gesunde Probanden eine MRT und Sonographie einer Hand. Als nächstes erfolgte die sonographische Untersuchung beider Hände bei Patienten mit radiologisch oder arthroskopisch diagnostizierter SL-Bandruptur. Abschließend wurden Patienten mit carpalen Beschwerden mittels Ultraschall untersucht und weiterführende Untersuchungen wie beispielsweise Arthroskopie oder MRT zum Ausschluss oder Beweis einer Bandverletzung herangezogen. Eingeschlossen waren 40 Patienten bzw. Probanden, wobei insgesamt 70 Hände untersucht wurden. In die Betrachtung gingen die Darstellbarkeit des scapholunären Bandes und der scapholunäre Abstand im

Seitenvergleich sowie im Vergleich zu den anderen Methoden (MRT, Arthroskopie, Operation) ein. Geprüft wurde auf Unterschiede mittels Wilcoxon-Test und auf Übereinstimmung mittels Intra-Class-Korrelationskoeffizient bzw. Cohens-Kappa und Bland-Altman-Plots. Es wurden Cut-off-Werte für den SL-Abstand für eine Läsion mittels ROC-Kurven und Youden-Index bestimmt. Die untersuchten Parameter wurden zur Erstellung eines Scores verwendet.

In der vorliegenden Arbeit konnte herausgefunden werden, dass ein intaktes Band im Ultraschall als hyperechogene, fibrilläre Struktur zwischen Scaphoid und Lunatum erscheint und sich bei Verletzung Banddiskontinuitäten oder ein hypoechogener Raum zeigt. Die Darstellung eines intakten Bandes gelang dorsal in 89,6 % und palmar in 83,3 % der Fälle. In dieser Arbeit wurde für ein intaktes Band ein Abstand dorsal/Mitte/palmar von 5/2/5,1 mm (Bereich 3,2-6,7/0,9-4/3,1-7,8 mm) und bei Läsion von 6,4/3/6,3 mm (Bereich 5-9,4/2-6,2/4-9,3 mm) gefunden. Linke und rechte Hand unterschieden sich bei intaktem Band maximal um 2,1/1,1/1,8 mm, im Mittel um 0,4/0,2/0,2 mm und bei Verletzung um 1,2/0,9/1,1 mm. Abstandswerte für Teilrupturen lagen im Bereich für Komplettrupturen und positionierten sich im unteren Intervall. Die Funktionsaufnahmen (Radial- und Ulnarduktion) zeigen physiologische, zum Teil jedoch unvorhersehbare Abstandswerte und sind eher zur Veränderung der Bandspannung während der Untersuchung geeignet. Als Cut-off-Werte für eine Läsion wurden dorsal (Sensitivität/Spezifität) 5,05 mm (0,95/0,604), Mitte 1,95 mm (1/0,625) und palmar 6,15 mm (0,55/0,854) ermittelt. Der erstellte sonographische SL-Band-Score besitzt eine hohe AUC (Area under the curve) von 0,93, eine Sensitivität von 85 % und eine Spezifität von 90 %. Die dargestellten Parameter erlauben, insbesondere in kombinierter Form als Score, eine Aussage zur Intaktheit des SL-Bandes. Die Sonographie kann somit als Diagnostikum und Screeningmethode für eine scapholunäre Bandläsion empfohlen werden und sollte als Routineinstrument etabliert werden. Perspektivisch muss durch große Fallzahlen eine Überprüfung und Anpassung der Kriterien erfolgen.

2. Einleitung

Die Hand ermöglicht uns die Interaktion mit unserer Umwelt. Sie dient nicht nur als Stütz-, Halte- und Greifwerkzeug, sondern ist auch für die nonverbale Kommunikation und als vielfältiges Sinnesorgan von Bedeutung. Ihre Funktion exponiert sie jedoch gegenüber Verletzungen. Ein Sturz auf das Handgelenk kann gravierende Folgen haben. Bänderrisse können Instabilitäten und im schlimmsten Fall Gefügestörungen mit Arthroseentstehung nach sich ziehen. Eine besondere Rolle innerhalb des Bandsystems nimmt dabei das scapholunäre Band (SL-Band) ein. Es besitzt eine zentrale Funktion für die Stabilität der Hand. Verletzungen mit SL-Dissoziation können sukzessiv zu Instabilität, Schmerzen und Folgeschäden führen, welche schwerwiegende Konsequenzen für den Patienten haben (Prommersberger et al. 2014, Neubrech et al. 2012). Umso wichtiger ist die frühe und korrekte Diagnostik von Verletzungen des Handgelenks, insbesondere der scapholunären Bandläsion, um eine darauf aufbauende Therapie einleiten zu können. So kann beispielsweise die Entwicklung einer irreversiblen scapholunate advanced collapse Wrist (SLAC-Wrist) verhindert werden. (Branco 2013, Davis und Blankenbaker 2010, Frank et al. 2015, Megerle und Machens 2015) Zur Detektion von Verletzungen existieren diverse Verfahren mit unterschiedlichem Stellenwert. Obwohl die Sonographie als einfach durchzuführendes, nicht schädliches und kostengünstiges Verfahren bereits ein breites Anwendungsfeld zur Beurteilung von Sehnen, Gefäßen, Nerven und Gelenken bietet, ist sie für die Beurteilung des SL-Bandes noch nicht etabliert (Davis und Blankenbaker 2010, Reiser et al. 2011, Arastéh und Baenkler 2013, Henne-Bruns und Barth 2012, Niethard et al. 2014, Henderson et al. 2015). Die Verbesserung der Technologie mit Entwicklung von hochauflösenden Hochfrequenzschallköpfen macht die Sonographie zu einer sehr guten Screeningmethode für Weichgewebsschäden (Toprak et al. 2014).

In der vorliegenden Dissertationsschrift wird ein standardisiertes Untersuchungsverfahren mit Kriterien zur Beurteilung des scapholunären Bandes erstellt.

2.1. Anatomie des Handgelenks

2.1.1 Knochen und Gelenke

Der Unterarm wird von Radius und Ulna gebildet, welche in der Articulatio (Art.) radioulnaris distalis miteinander artikulieren und über die Membrana interossea antebrachii verbunden sind (Schünke et al. 2007, Aumüller et al. 2010). Topographische Landmarken sind der Processus styloideus radii, der Proc. styloideus ulnae und das Tuberculum dorsale radii (Tuberculum von Listeri) (Abbildung 1, Abbildung 2).

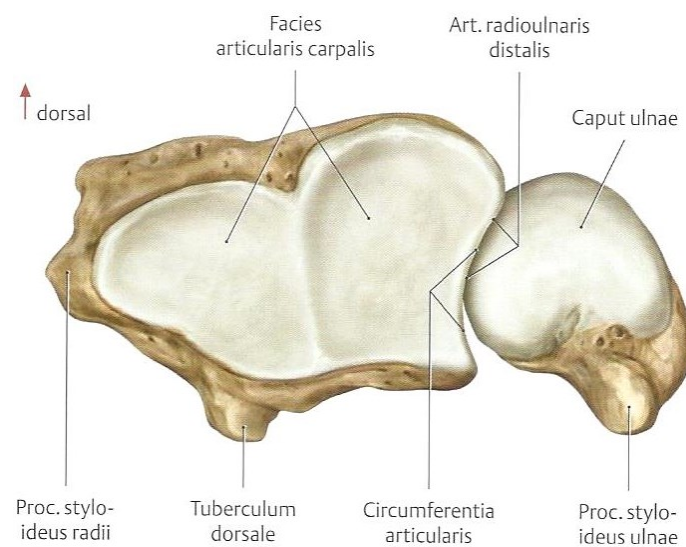


Abbildung 1: Ansicht auf die distalen Gelenkflächen von Radius und Ulna eines rechten Unterarms (modifiziert aus Schünke et al. 2007)

Der knöcherne Anteil der Hand gliedert sich in Carpus (Handwurzel), Metacarpus (Mittelhand) und Digiti manus (Finger). Anatomisch sind die Ossa carpi (Handwurzelknochen) in zwei Reihen angeordnet. Von radial nach ulnar sind dies für die proximale Reihe Os scaphoideum, Os lunatum, Os triquetrum und das Os pisiforme als Sesambein in der Sehne des Musculus flexor carpi ulnaris, für die distale Reihe Os trapezium, Os trapezoideum, Os capitatum und das Os hamatum (Abbildung 2). (Aumüller et al. 2010, Schünke et al. 2007)

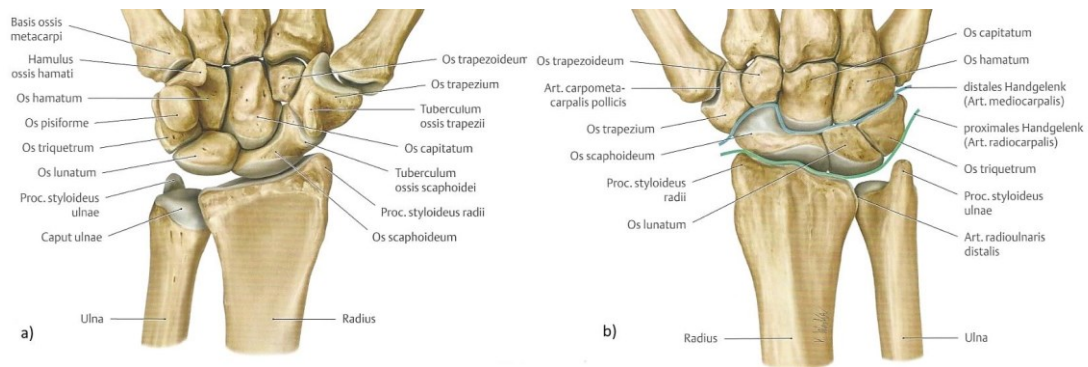


Abbildung 2: Ausschnitt Knochen der rechten Hand mit Fokus auf den Handwurzelknochen, a) von palmar b) von dorsal (modifiziert aus Schünke et al. 2007)

Die Gelenkflächen des proximalen Handgelenks (Art. radiocarpalis) werden von der Facies articularis carpalis radii und dem Discus articularis ulnae (Discus ulnocarpalis) sowie der proximalen Handwurzelreihe gebildet. Die distale Radiusgelenkfläche steht in einem radioulnaren Neigungswinkel von 20-25° sowie einem dorsopalmaren Winkel von 10-15° zur Unterarm längsachse (Abbildung 3). Das distale Handgelenk (Art. mediocarpalis) wird durch die Reihen der proximalen und distalen Ossa carpi gebildet. (Schünke et al. 2007)

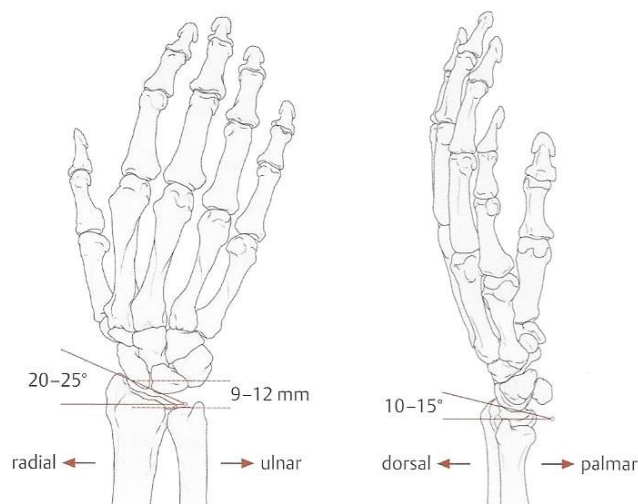


Abbildung 3: Neigungswinkel der Gelenkflächen am distalen Radius (aus Schünke et al. 2007)

2.1.2 Bandsystem der Hand

Der Bandapparat der Hand ist hochkomplex. Es existieren verschiedene Einteilungen und Systematiken (Schmidt 2003). Die eher oberflächlich verlaufenden extrinsischen Bänder, welche von Radius oder Ulna entspringen und an einem oder mehreren Handwurzelknochen inserieren, sind eng mit der Gelenkkapsel verbunden und stabilisieren diese. Die intrinsischen Bänder liegen in der Tiefe als interossäre Bänder und setzen nur an den Handwurzelknochen, nicht jedoch an Unterarmknochen an. (Davis und Blankenbaker 2010, Aumüller et al. 2010, Schünke et al. 2007).

Im Folgenden soll nur auf das Band zwischen Os scaphoideum und Lunatum, das Ligamentum scapholunatum (SL-Band), eingegangen werden.

2.1.3 Scapholunäres Band

Es zählt zu den interossären Bändern (Aumüller et al. 2010, Schmidt 2003). Zusammen mit dem Ligamentum lunotriquetrum trennt es das Radiocarpalgelenk vom mediocarpalen Kompartiment (Abbildung 4; Davis und Blankenbaker 2010, Moser et al. 2008, Zlatkin und Rosner 2006).

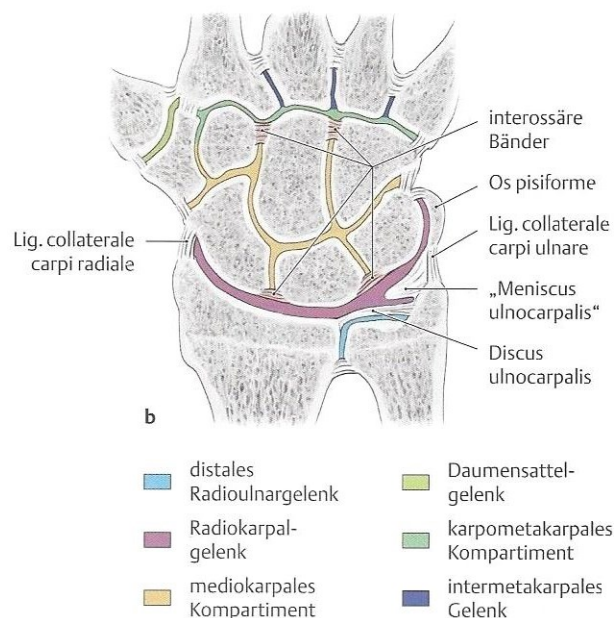


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Gelenkkompartimente - rechte Hand in der Ansicht von dorsal (modifiziert aus Schünke et al. 2007)

Das SL-Band inseriert ulnarseitig am proximalen Scaphoideumpol und zieht schräg zur radialseitigen Fläche des Lunatum (Schmidt 2003; Abbildung 5). Es ist U-förmig und lässt sich nach Berger in drei Abschnitte gliedern (Berger 1996, Schmidt 2003, Prommersberger et al. 2014):

- Dorsalseitig ist das Band mit einer Dicke von 3 mm und kurzen quer verlaufenden Fasern am kräftigsten. Dadurch „hat es eine wichtige Funktion in der Erhaltung der karpalen Stabilität.“ (Schmidt 2003, Berger et al. 1982)
- Der mittlere (proximale) Teil enthält Faserknorpel (Schmidt 2003, Smith 1994, Johnston et al. 1995, Sokolow und Saffar 2001). Dieser Teil stellt den schwächsten Abschnitt dar (Prommersberger et al. 2014).
- „Palmar ist das Band etwa 1 mm dick und besteht aus schräg verlaufenden kollagenen Fasern.“ (Schmidt 2003)

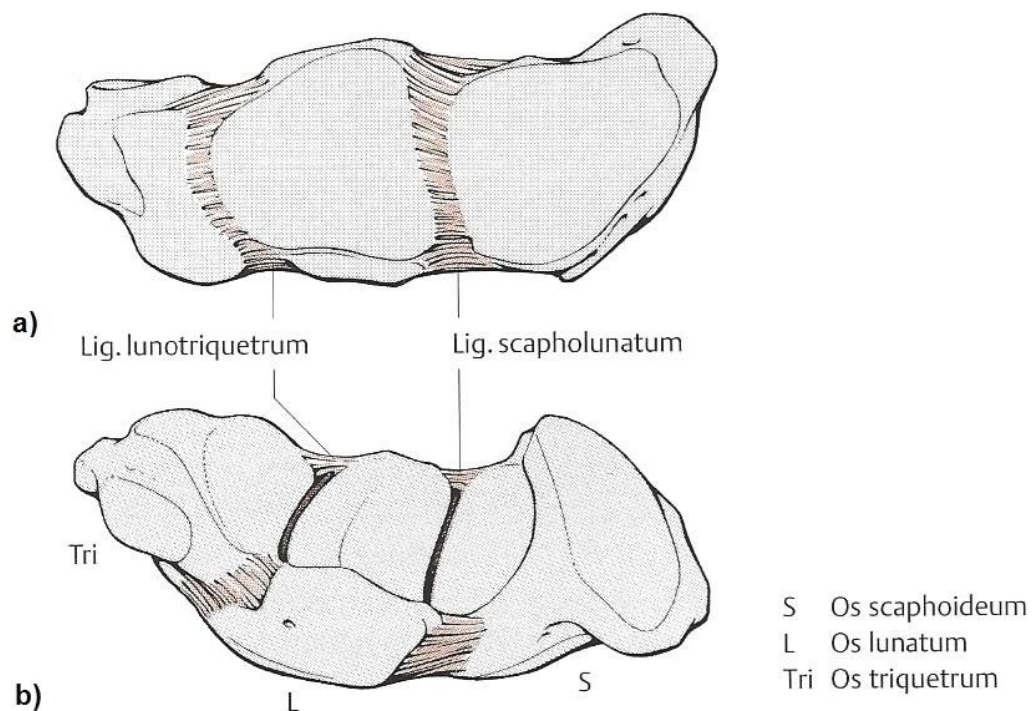


Abbildung 5: Interossäre Bänder an den proximalen Handwurzelknochen:
a) von proximal b) schräg von palmar und distal (modifiziert aus Schmidt 2003)

2.1.4 Carpale Kinematik

Es existieren mehrere Stabilitätskonzepte für die Handwurzel (Schmidt 2003; Abbildung 7). Für die Biomechanik bedeutsam ist die funktionelle Einteilung der Hand in drei longitudinale Säulen: eine radiale Skaphoidsäule (Ossa scaphoideum, trapezium und trapezoideum), eine zentrale Lunatumsäule (Ossa lunatum und capitatum) sowie eine ulnare Triquetrumsäule (Ossa triquetrum und hamatum) (Schünke et al. 2007; Abbildung 6).

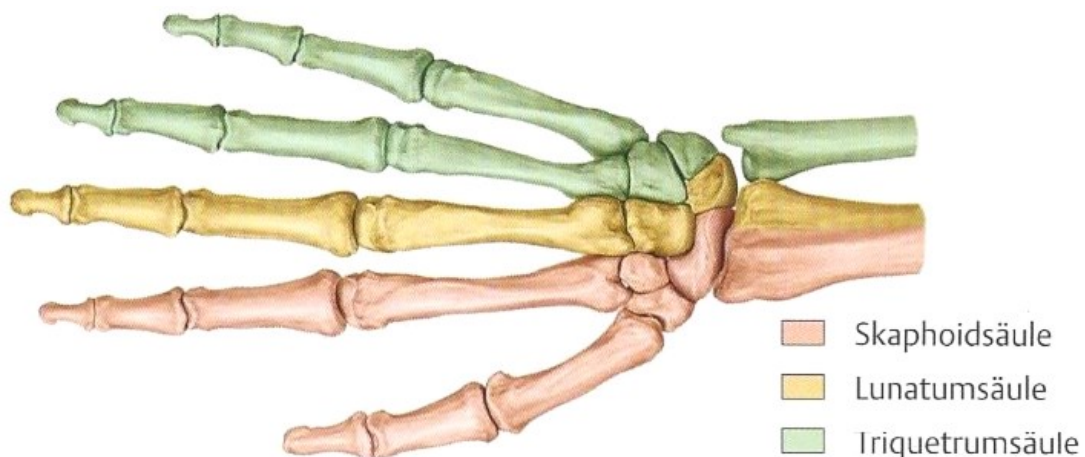


Abbildung 6: Säulenmodell der Hand, Ansicht von dorsal (aus Schünke et al. 2007)

Die Säulen- bzw. Pfeiler-Theorie geht auf Navarro zurück und wurde durch Taleisnik modifiziert (Navarro 1937, Taleisnik 1985). Die zentrale Säule tritt über das Os capitatum und Os lunatum T-förmig mit dem Radius in Verbindung (Abbildung 7). Durch seine Form hat das Os lunatum die Tendenz „nach palmar aus dem Karpus herauszutreten und nach dorsal zu kippen“ (Schmidt 2003). In der radialen Säule wirken Os trapezium und Os trapezoidem dem Scaphoid so entgegen, dass es nach palmar gedreht werden würde. Die gegensätzlichen Bewegungstendenzen von Scaphoid und Lunatum heben sich bei intaktem scapholunärem Band gegenseitig auf. Entsprechend kann bei Verletzung des Bandes eine Fehlstellung der Handwurzelknochen resultieren (siehe auch „Projektionsradiographie“ Seite 21). Das Ringmodell nach Lichtmann versteht die Handwurzelknochen als einen unter Spannung stehenden Ring (Lichtman et al. 1981).

Bei ligamentären oder ossären Verletzungen klaffen demnach die Bruchenden auf (Schmidt 2003). Daraus erklärt sich beispielsweise die scapholunäre Dissoziation, welche später näher erläutert wird. Abbildung 8 zeigt die Bewegungstendenzen von Os scaphoideum und Os lunatum bei karpaler Instabilität (z.B. bei scapholunärer Bandruptur).

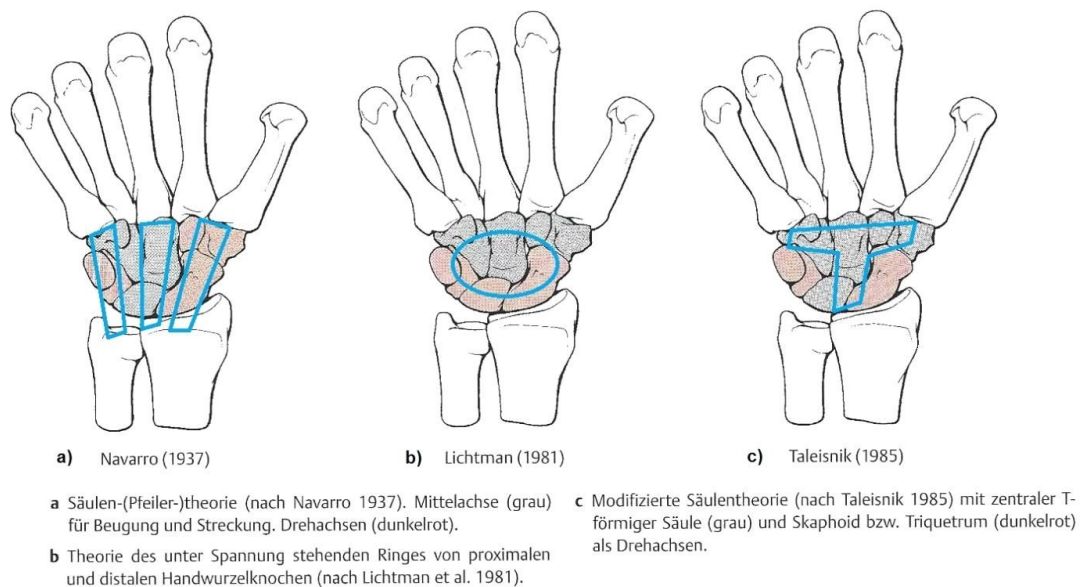


Abbildung 7: Darstellung der Stabilitätskonzepte der Handwurzel (modifiziert aus Schmidt 2003)

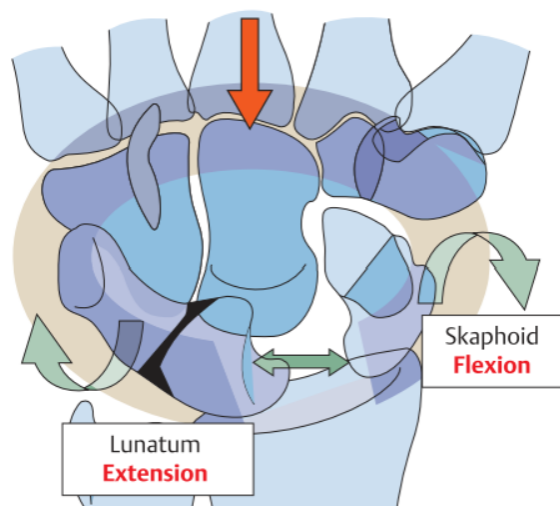


Abbildung 8: Bewegungstendenzen der Carpalknochen bei carpaler Instabilität (aus Megerle und Machens 2015)

Für die Erkennung und Beurteilung von verletzungsbedingten Fehlstellungen ist weiterhin wichtig, dass die Längsachsen der Finger in Normalposition nahezu parallel stehen, bei abduziertem Daumen und gespreizten Fingern auf einen Schnittpunkt im Os capitatum und bei Beugung der Fingergelenke auf einen Schnittpunkt im Os scaphoideum konvergieren (Schünke et al. 2007; Abbildung 9).

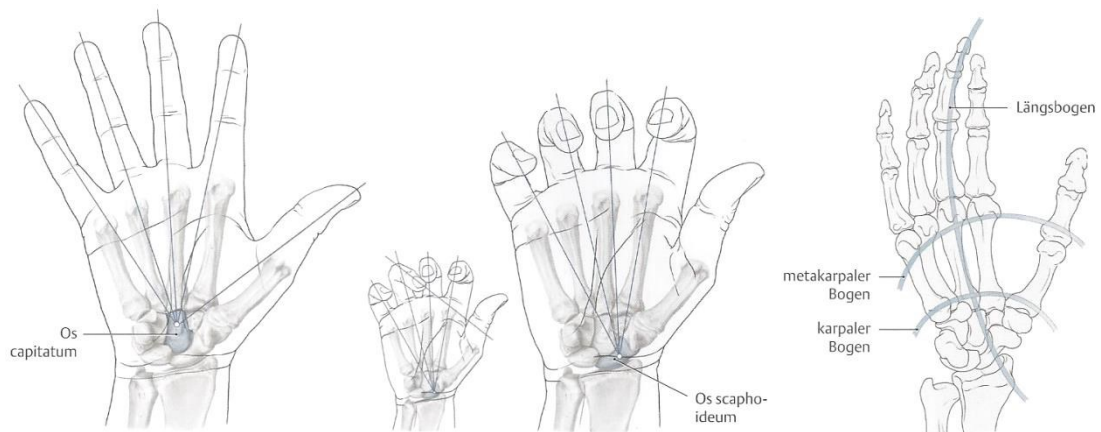


Abbildung 9: Architektur der Mittelhand (aus Schünke et al. 2007)

2.1.5 Bedeutung des SL-Bandes

Wie zuvor beschrieben, wirkt das SL-Band als Stabilisator des Handgelenks und hebt die gegensätzlichen Bewegungstendenzen von Kahn- und Mondbein auf (Schmidt 2003, Megerle und Machens 2015).

Vor allem in den reich vaskularisierten dorsalen Arealen des Bandes finden sich Nervenfaszikel und sensorische Korpuskel (Hagert et al. 2004, Hagert et al. 2007). Durch seine Innervation trägt es „zur karpalen Propriozeption und damit zur dynamischen Stabilisation des Handgelenks bei (Prommersberger et al. 2014).“ (Prommersberger et al. 2014, Hagert et al. 2004, Hagert et al. 2007)

2.2. Die scapholunäre Bandläsion / Dissoziation

2.2.1 Begriffsdefinitionen

Scapholunäre Bandläsion

Bei Verletzung des SL-Bandes kommt es zur kompletten oder inkompletten Ruptur der Anteile (dorsal, palmar, proximal) mit möglicher Spaltverbreiterung, Knochenfehlstellung und karpaler Instabilität (Frank et al. 2015, Davis und Blankenbaker 2010).

Scapholunäre Dissoziation

„Die SLD [scapholunäre Dissoziation] wird als Instabilität des Kahnbeins, bedingt durch eine akute oder chronische Schädigung seiner Bandverbindung zum Mondbein und des palmaren oder dorsalen Kapsel-Band-Apparats, bezeichnet“ (Towfigh et al. 2011).

Scapholunäre Instabilität

Eine scapholunäre Instabilität ist definiert als Handgelenk, welches symptomatisch während mechanischen Aktivitäten und Belastung ist und eine abnormale Kinematik während Bewegung zeigt (Garcia-Elias et al. 1999).

Bandlaxizität

Sie ist definiert als erhöhte Dehnbarkeit beziehungsweise Beweglichkeit von Bändern (und konsekutiv von Gelenken), welche erworben (Dehnungsübungen, Traumen, hormonelle Einflüsse) oder vererbt (Ehlers-Danlos-Syndrom, Marfan-Syndrom) sein kann (Steinmann und Gitzelmann 1984). Bandlaxizitäten finden sich „häufig bei jüngeren weiblichen Patienten mit Überlastungsbeschwerden (gleichförmige Belastung, z. B. langes Schreiben und PC-Arbeiten in gleicher Körperhaltung)“ (Frank et al. 2015).

Handgelenksinstabilität

Die Stabilität des Handgelenkes ist durch die klinische Untersuchung definiert als Bewegung und Kraft, welche keinen Schmerz oder Schwäche bei Belastung produziert. Alternativ kann die Handgelenksinstabilität als ein schmerzhaftes Handgelenk mit Schwäche, Schmerz bei Extrembewegungen und Nachgeben bei Stresstestung bezeichnet werden. (Cooney 2010)

2.2.2 Epidemiologie

Innerhalb der carpalen Bandverletzungen tritt die SL-Bandläsion am häufigsten auf (Megerle und Machens 2015, Towfigh et al. 2011). „Die Inzidenz der isolierten skapholunären Bandruptur ist nicht bekannt“ (Prommersberger et al. 2014). Auch Forward et al. beschreiben, dass die wahre Prävalenz der Verletzung interkarpaler Bänder nicht bekannt sei (Forward et al. 2007). Eine genaue Inzidenz bzw. Prävalenz der isolierten SL-Bandverletzung kann somit nicht hinreichend festgestellt werden. Quellen bezüglich der Häufigkeit beziehen sich meist auf die scapholunäre Bandruptur als Begleitverletzung von Frakturen (Frank et al. 2015, Prommersberger et al. 2014, Forward et al. 2007). Towfigh et al. beschreiben, dass aufgrund der vielfältigen Instabilitäten im Handwurzelknochenbereich, welche einzeln oder kombiniert auftreten und je nach Verletzung und Belastung unterschiedliche Symptomaten zeigen, eine genaue epidemiologische Bestimmung nicht möglich sei (Towfigh et al. 2011). Prommersberger et al. fanden „Im eigenen Patientengut [...] bei der CT-Arthrografie (CT: Computertomografie) von 233 intraartikulären Frakturen des distalen Radius 65-mal Läsionen des dorsalen, 52-mal des mittleren und 23-mal des palmaren Bandabschnitts. Der für die Stabilität entscheidende dorsale Bandabschnitt wies 20 Komplettrupturen auf“ (Prommersberger et al. 2014). Prommersberger et al. zitieren folgende Autoren bezüglich der Prävalenz der SL-Bandläsion (Prommersberger et al. 2014). So konnten Jørgsholm et al. mittels Arthroskopie bei 70,7 % (29 von 41) der Kahnbeinfrakturen eine Verletzung des scapholunären Bandes nachweisen, wobei dieses in 24,4 % (10) der Fälle eine Komplettruptur aufwies (Jørgsholm et al. 2010).

Strobel et al. wiesen bei MRT-Untersuchungen (ca. 5,5 Jahre postoperativ) in 35 % der Fälle nach transscaphoidaler perilunärer Luxationsfraktur eine SL-Bandläsion (5 Komplet- und 2 Teilrupturen) nach (Strobel et al. 2014). Frank et al. fanden in 8 % der Fälle mit Radiusfraktur eine relevante Instabilität aufgrund von SL-Bandverletzung (Frank et al. 2015). Klempka et al. beschrieben bei 9 % der Patienten mit distaler intraartikulärer Radiusfraktur eine SL-Bandverletzung (Klempka et al. 2016).

2.2.3 Ätiologie

Häufigster Verletzungsmechanismus, der zu einer scapholunären Dissoziation führt, ist der Sturz auf das in Hebeextension fixierte Handgelenk. Akute Verletzungen des SL-Bandes entstehen durch Hyperextensionstraumata oder sind Begleitverletzungen bei Radiusfrakturen. Ältere Verletzungen, die unter Umständen bereits zum carpalen Kollaps geführt haben, können durch ein erneutes Trauma aktiviert werden. Seltene Ursachen einer scapholunären Bandschädigung können rheumatoide Entzündungen, Handgelenkganglien, iatrogene Verletzungen und Infektionen sein. (Towfigh et al. 2011, Bickert und Kneser 2015, Frank et al. 2015)

2.2.4 Klinische Symptomatik

Scapholunäre Bandläsionen mit konsekutiver Dissoziation können verschiedene Symptome verursachen. Ausgelöst durch Subluxationen des Os scaphoideum treten Schmerzen im Radiokarpalbereich auf. Durch Schnappphänomene entstehen Mikrotraumatisierungen des Gelenkknorpels. Diese können akustisch als Klickgeräusche beziehungsweise als Gelenkknirschen festgestellt werden. Da Scaphoid und Lunatum aufgrund der Bandläsion nicht, beziehungsweise nicht vollständig, miteinander verbunden sind, können Bewegungseinschränkungen auftreten. Aufgrund des Kahnbeinkollaps und vorhandener Schmerzen im Rahmen der SLAC-Wrist (scapholunate advanced collapse) kann eine Kraftminderung auftreten. (Towfigh et al. 2011) Eine streckseitige Handgelenksschwellung ist bei reaktiver Synovitis über dem Bandkomplex möglich (Towfigh et al. 2011) und kann auf einen karpalen Kollaps mit Arthrose hinweisen (Bickert und Kneser 2015).

2.2.5 Folge

Bei länger bestehender scapholunärer Dissoziation kann es im Verlauf zum Aufbrechen des karpalen Gefüges kommen und sich ein karpaler Kollaps entwickeln. Im Rahmen von ligamentären Verletzungen spricht man von der sogenannten SLAC-Wrist. Liegt eine knöcherne Verletzung zugrunde (Scaphoidpseudarthrose) wird dies als SNAC-Wrist (scaphoid nonunion advanced collapse) bezeichnet. Wie Abbildung 10 zeigt, entwickeln sich in spezifischer Reihenfolge Arthrosen der Gelenke. (Towfigh et al. 2011)

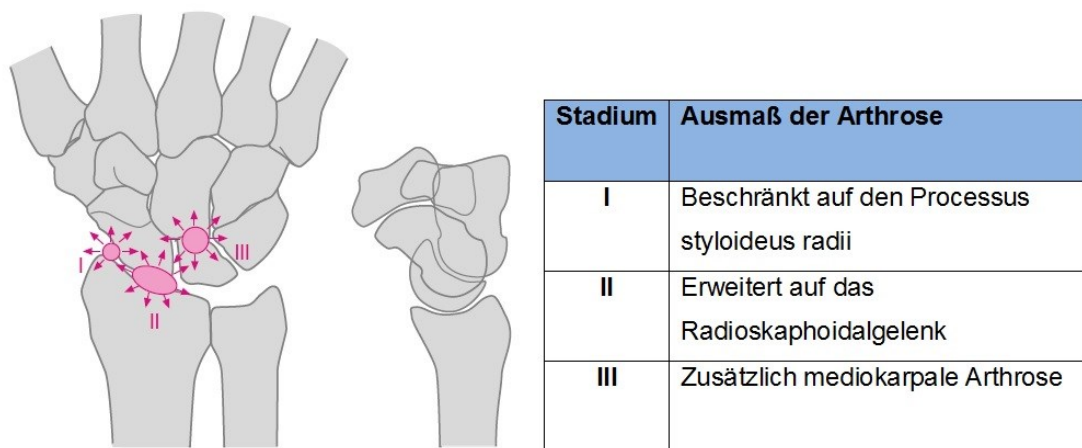


Abbildung 10: SLAC-Wrist nach Watson: Stadieneinteilung; Reihenfolge der Arthroseentstehung: II,I,III (modifiziert aus Towfigh et al. 2011)

2.3. Klassifikationen

Die Handgelenksinstabilität sowie scapholunäre Dissoziation können anhand verschiedener Merkmale klassifiziert werden. Diese werden im Folgenden dargestellt.

2.3.1 Carpale Instabilität

Nach Larsen (Larsen et al. 1995) kann die carpale Bandverletzung anhand verschiedener Kategorien eingeteilt werden. So ist eine Unterscheidung anhand von Zeit, Konstanz, Ätiologie, Lokalisation, Richtung und Muster möglich (Frank et al. 2015, Larsen et al. 1995; Tabelle 1).

Kategorie I	Kategorie II	Kategorie III	Kategorie IV	Kategorie V	Kategorie VI
Zeit	Konstanz	Ätiologie	Lokalisation	Richtung	Muster
Akut (<1 Woche)	Statisch, nicht reduzierbar	Kongenital	Radiokarpal	VISI-Rotation	Dissoziative karpale Instabilität (CID)
Subakut	Statisch, reduzierbar	Traumatisch	Proximal interkarpal	DISI-Rotation	
Chronisch (>6 Wochen)	Dynamisch	Entzündlich	Mediokarpal	Ulnare Translation	Karpale Instabilität ohne Dissoziation (CIND)
	Präodynamisch	Arthrose	Distal Interkarpal	Radiale Translation	Komplexe karpale Instabilität (CIC)
		Neoplastisch	Karpometakarpal	Palmare Translation	Adaptive karpale Instabilität (CIA)
		Iatrogen	Knochenspezifisch	Dorsale Translation	
		Sonstiges		Proximale Translation	
				Distale Translation	

Tabelle 1: Klassifikation der carpalen Instabilität nach Larsen (modifiziert aus Frank et al. 2015)

Eine weitere Einteilung basiert auf der Mayo-Klassifikation der karpalen Instabilität (Frank et al. 2015; Tabelle 2). Hierbei werden vier verschiedene Dissoziationsbilder anhand von Merkmalen wie beispielsweise Lokalisation und Fehlstellung unterschieden.

CID	CIND	CIC	CIA
Dissoziative carpale Instabilität	Carpale Instabilität ohne Dissoziation	Komplexe carpale Instabilität	Adaptive carpale Instabilität
1.1. Proximale Reihe a. Scaphoidfraktur b. SL-Dissoziation c. LT-Dissoziation 1.2. Distale Reihe a. Axial radial b. Axial ulnar c. Kombinationen 1.3. Kombinationen	2.1. Proximale Reihe a. Palmare Bandruptur b. Dorsale Bandruptur c. Z. n. Fehlheilung 2.2. Distale Reihe a. Ulnopalmare Dislokation b. Radiopalmare Dislokation c. Kombinationen aus a) und b) d. Dorsale Dislokation 2.3 Kombinationen	a. Perilunär mit radiokarpaler Instabilität b. Perilunär mit axialer Instabilität c. Radiokarpal mit axialer Instabilität d. SL-Dissoziation mit ulnarer Translation	a. Fehlverheilte Radiusfraktur b. Madelung-Deformität

Tabelle 2: Mayo-Klassifikation der carpalen Instabilität (modifiziert aus Frank et al. 2015)

2.3.2 Chronizität

Es kann zwischen einer akuten, subakuten und chronischen Dissoziation differenziert werden. Das Ereignis liegt bei akuten Dissoziationen weniger als sieben Tage zurück, bei subakuten zwischen sieben Tagen und sechs Wochen. Wird diese Zeit überschritten, bezeichnet man das als chronische Dissoziation. (Towfigh et al. 2011)

2.3.3 Art der Instabilität

„Die Entstehung von Instabilitäten hängt von der Schwere der knöchernen und ligamentären Verletzung bzw. Degeneration der Knochenknorpel und ligamentären Strukturen der carpalen Knochen ab“ (Towfigh et al. 2011). Es wird zwischen statischer und dynamischer Instabilität unterschieden. Bei der statischen Instabilität besteht eine fixierte Fehlstellung der Handwurzelknochen. Eine Korrektur durch manuelle Manipulation ist nicht möglich. Anders verhält es sich bei der dynamischen Instabilität. Hierbei kann die Fehlstellung bei Bewegung oder gezielte Untersuchung durch den Arzt provoziert werden, wobei häufig ein schmerzhaftes Klicken auftritt. Eine abschließende Diagnose darf jedoch erst nach „[...] röntgenkinematografischen Untersuchungen, Arthrografie des Handgelenks oder MRT-Untersuchungen gestellt werden [...]“. (Towfigh et al. 2011)

2.3.4 Stadieneinteilung der scapholunären Dissoziation (SLD)

Die SLD wird in drei Schweregrade eingeteilt. Grad I beschreibt dabei eine Teilruptur des scapholunären Bandes ohne Handgelenksinstabilität. Bei Grad II liegt eine komplette Ruptur des Bandes ohne Achsenfehlstellung vor, wobei eine dynamische Rotationsinstabilität des Scaphoids besteht. Grad III zeichnet sich durch eine Totalruptur des SL-Bandes aus, wobei eine Achsenfehlstellung des Os scaphoideum mit Palmarflexion und DISI- (dorsal intercalated segment instability) oder PISI-Position (palmar intercalated segment instability) des Os lunatum bestehen (siehe auch 2.4.2 „Projektionsradiographie“ Seite 21). Es handelt sich dabei um eine statische Instabilität. (Towfigh et al. 2011) Abbildung 11 zeigt das anatomische Korrelat der unterschiedlichen SLD-Stadien.

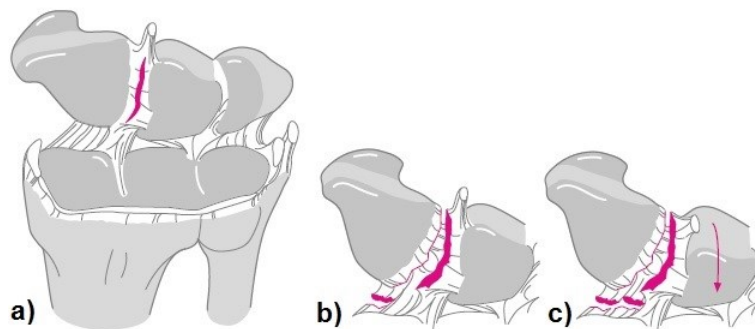


Abbildung 11: Stadien der SLD: a) Grad I, b) Grad II, c) Grad III (aus Towfigh et al. 2011)

Das Vollbild der scapholunären Dissoziation ist somit geprägt durch scapholunäre Spaltbildung, DISI-Stellung des Os Lunatum, Flexionsstellung des Os scaphoideum (SLAC) mit erweitertem SL-Winkel (Towfigh et al. 2011).

2.3.5 Arthroskopische Stadieneinteilung

Für die arthroskopische Stadieneinteilung der SL-Bandläsion existieren verschiedene Klassifikationen. Im Folgenden sind zwei tabellarisch dargestellt. Tabelle 3 zeigt die Klassifikation nach Geissler (Geissler et al. 1996).

Schweregrad	Arthroskopischer Befund
Grad 1	Betonung oder Einblutung des interossären Bandes bei Betrachtung aus dem radiokarpalen Raum. Keine Inkongruenz des karpalen Alignements im mediokarpalen Raum
Grad 2	Betonung oder Einblutung des interossären Bandes bei Betrachtung aus dem radiokarpalen Raum. Inkongruenz oder Stufenbildung im karpalen Raum. Eine eventuell vorhandene Lücke zwischen den Karpalia ist kleiner als die Sondenweite
Grad 3	Inkongruenz oder Stufenbildung im karpalen Raum bei Betrachtung aus dem radiokarpalen und mediokarpalen Raum. Die Sonde (1 mm) kann durch eine interkarpale Lücke geführt werden
Grad 4	Inkongruenz oder Stufenbildung im karpalen Raum bei Betrachtung aus dem radiokarpalen und mediokarpalen Raum. Grobe Instabilität bei Manipulation. Das 2,7 mm Arthroskop kann durch eine interkarpale Lücke geführt werden

Tabelle 3: Arthroskopische Klassifikation der scapholunären Bandläsion nach Geissler (modifiziert nach Geissler et al. 1996)

Eine neuere arthroskopische Einteilung stellt die EWAS (European Wrist Arthroscopy Society) Klassifikation dar (Messina et al. 2013, Jotanovic et al. 2014). Tabelle 4 zeigt die durch Frank et al. modifizierte Version (Frank et al. 2015).

Schweregrad	Arthroskopischer Befund
Grad 1	Sonde kann nicht eindringen
Grad 2	Die Sondenspitze kann in den Raum eindringen, ohne Erweiterung
Grad 3A Partielle Läsion palmar	Palmare Erweiterung bei dynamischer Untersuchung
Grad 3B Partielle Läsion dorsal	Dorsale Erweiterung bei dynamischer Untersuchung
Grad 3C Kompletter Ruptur, Gelenk reponibel	Vollständige Erweiterung des skapholunären Raums bei dynamischer Testung, die sich nach Sondenentfernung zurückbildet
Grad 4 Komplette Ruptur mit Spalterweiterung	Lücke im Gelenkspalt, Passage des Arthroskops möglich
Grad 5	Große Lücke mit Passagemöglichkeit und radiologischen Veränderungen

Tabelle 4: Arthroskopische EWAS Klassifikation der scapholunären Bandverletzung (aus Frank et al. 2015)

2.4. Diagnostik

Grundlage ist eine adäquate Anamneseerhebung beim Patienten. Dabei sollte auch auf ein etwaiges Unfallereignis sowie den Verlauf der Beschwerden eingegangen werden (Towfigh et al. 2011, Vogt 2011). Da die scapholunäre Bandverletzung zu einer karpalen Instabilität führt, zielt die Diagnostik auf die Detektion dieser ab. Dazu stehen spezifische klinische Tests und apparative Untersuchungen zur Verfügung (Towfigh et al. 2011). Folgendes diagnostisches Vorgehen bietet sich bei Verdacht auf eine karpale Instabilität an (modifiziert aus Towfigh et al. 2011):

- Anamnese (Ätiologie, Datum, Schmerzen, Klick-Phänomene)
- Klinische Untersuchung (Druckschmerz, Watson-Test, Ballotment-Test)
- Röntgen (im Seitenvergleich)
 - statisch (d.p. (p.a.), lateral → karpale Winkel, Gilula-Bögen)
 - dynamisch (Ulnardeviation, Stecher-Aufnahme)
- Kinematographie (Bildwandleruntersuchung im Seitenvergleich)
- MRT, MR-Arthrographie
- Arthroskopie
- Intraoperative Untersuchungen

Im Folgenden wird die spezifische Diagnostik für die scapholunäre Bandverletzung bzw. Dissoziation erläutert.

2.4.1 Klinische Untersuchung

An erster Stelle stehen die Inspektion und Palpation der Hand. Hierbei sollte unter anderem auf Fehlstellungen, Krepitationen oder Druckschmerz geachtet werden. Weiterhin stehen eine Reihe von spezifischen klinischen Tests zur Verfügung, welche durch Provokation einer Subluxation dynamische Instabilitäten aufdecken (Towfigh et al. 2011). Diese sollten immer im Seitenvergleich durchgeführt werden, um falsch-positive Befunde durch Bandlaxizität zu vermeiden (Towfigh et al. 2011, Pliefke 2008, Easterling und Wolfe 1994, Wolfe und Crisco 1994).

Zu beachten ist, dass die Untersuchung aufgrund von Schwellung, Schmerzen, Versteifung oder anderer Begleitverletzungen eingeschränkt oder sogar nicht möglich sein kann (Pliefke 2008, Green 2005, Schmitt et al. 2006). Klinisch sollte bereits differenziert werden, ob es sich um eine statische oder dynamische Instabilität handelt, wobei die statischen Instabilitäten auf ihre Reponierbarkeit geprüft werden (Towfigh et al. 2011).

Scaphoid-Shift-Test nach Watson

Dieser „Test dient der Diagnose einer skapholunären Bandverletzung mit Rotationsinstabilität des Skaphoids“ (Towfigh et al. 2011). Hierbei wird mit dem Daumen Druck auf das Tuberculum ossis scaphoidei ausgeübt und die Hand des Patienten von ulnar nach radial geführt. Wenn dabei der proximale Scaphoidpol mit einem schmerzhaften Klick nach dorsal subluxiert (Abbildung 12), ist der Test als positiv zu werten (Towfigh et al. 2011, Vogt 2011, Hoffmann 2009).

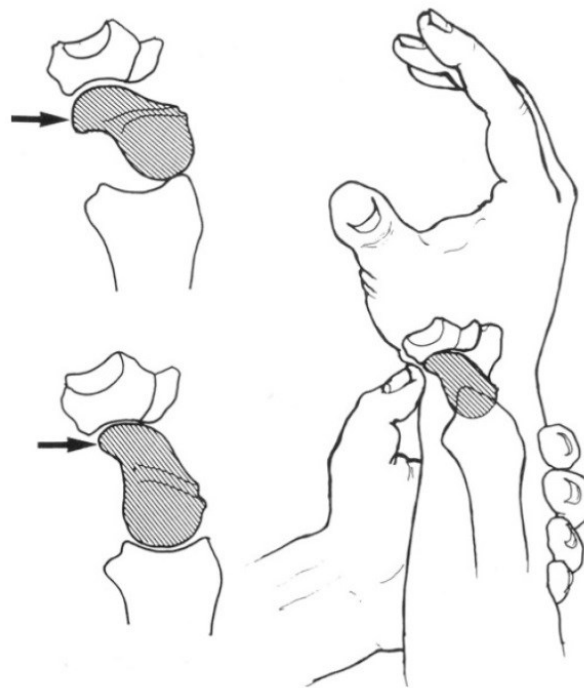


Abbildung 12: Scaphoid-Shift-Test nach Watson (aus Towfigh et al. 2011)

Er gilt als nahezu pathognomonisch für eine SL-Bandläsion (Prommersberger et al. 2014, Watson et al. 1988). Jedoch kann häufig bei jungen Frauen ohne vorheriges Trauma ein schmerzfreies Schnappphänomen ausgelöst werden, was auf einen laxen Bandapparat zurückzuführen ist. Wichtig ist somit der Schmerzcharakter des Schnappens. (Towfigh et al. 2011) Aufgrund der geringen Sensitivität und Spezifität (Vogt 2011) und falsch positiver Ergebnisse, reicht er nicht allein zur Diagnosestellung aus (Hoffmann 2009).

Scapholunärer Ballotement-Test

Hierbei werden Scaphoid und Lunatum „zwischen Daumen und Zeigefinger gehalten und gegensinnig in d.p. Ebene verschoben. Bei einer Läsion des SL-Bandes können hier Schmerzen auftreten“ (Towfigh et al. 2011).

2.4.2 Projektionsradiographie

Standardmäßig werden Röntgenaufnahmen in dorsopalmarer und seitlicher Ebene durchgeführt, wobei unbedingt auf die Neutralstellung des Handgelenks geachtet werden muss (Towfigh et al. 2011, Vogt 2011; Abbildung 13). Einige Autoren empfehlen das Mitröntgen der Gegenseite, um Normvarianten von Pathologien zu unterscheiden (Towfigh et al. 2011, Vogt 2011, Megerle und Machens 2015).

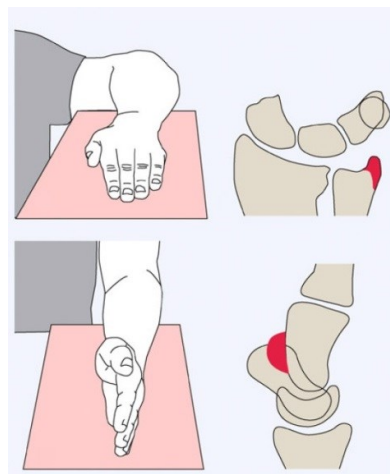


Abbildung 13: Schemata zur Projektionsradiographie des Handgelenks in Neutralstellung (aus Towfigh et al. 2011)

Bestimmt wird unter anderem die Gelenkflächeninklination des Radius in dorsopalmarer (d.p.) und seitlicher Projektion (siehe auch Abbildung 3 Seite 5). Karpale Gefügestörungen können bei Unterbrechung der Gilula Bögen bestehen. Diese bilden normalerweise in der d.p. Projektion drei harmonische, parallel und ohne Unterbrechung verlaufende Verbindungslinien entlang der proximalen und distalen Handwurzelreihe (Towfigh et al. 2011, Hoffmann 2009, Vogt 2011; Abbildung 14).

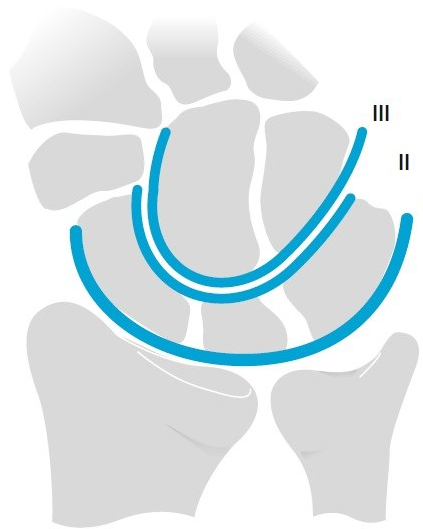


Abbildung 14: Konzentrische Bögen nach Gilula (aus Towfigh et al. 2011)

In der seitlichen Aufnahme können die Stellung des Os lunatum, welches physiologischerweise in Neutralstellung steht, bewertet, sowie die karpalen Winkel bestimmt werden (Towfigh et al. 2011). Im Folgenden wird nur auf den scapholunären Winkel eingegangen. Dieser beträgt beim Gesunden $45^\circ \pm 15^\circ$ (Towfigh et al. 2011, Vogt 2011, Hoffmann 2009; Abbildung 15). Bei der dorsalen Instabilität, auch als DISI (dorsal intercalated segment instability) bezeichnet, kippt die distale Lunatumgelenkfläche nach dorsal, das Scaphoideum nach palmar. Dadurch wird der SL-Winkel pathologisch vergrößert. (Towfigh et al. 2011, Hoffmann 2009) Die DISI Fehlstellung tritt häufig nach Läsion des scapholunären und radiopalmaren Bandes auf (Hoffmann 2009).

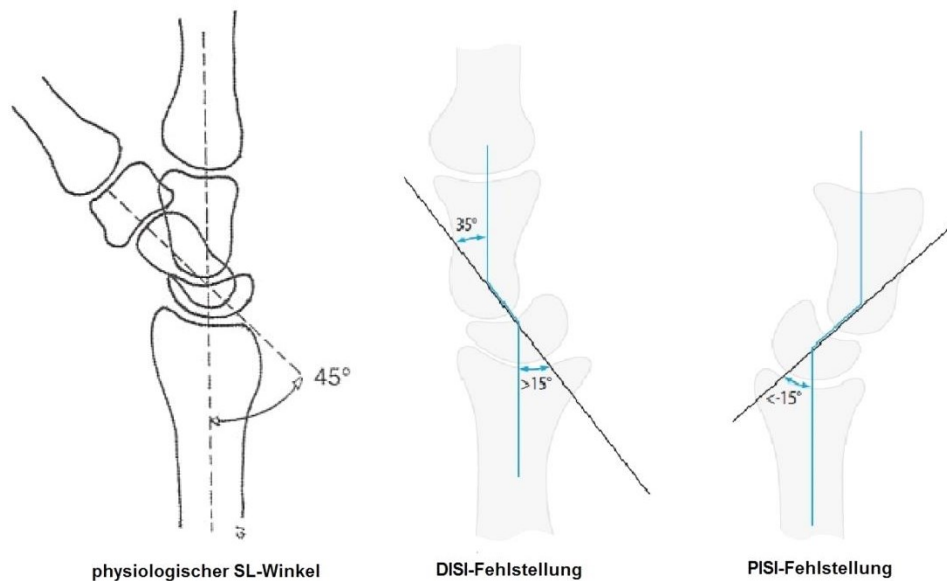


Abbildung 15: Bestimmung des scapholunären Winkels. Physiologische und pathologische Stellung des Os lunatum (modifiziert aus Hoffmann 2009, Towfigh et al. 2011)

Kippt das Lunatum nach palmar, wodurch sich der skapholunäre Winkel pathologisch verkleinert, bezeichnet man die palmare Instabilität als PISI (palmar intercalated segment instability) (Abbildung 15). Sie ist seltener als die DISI-Fehlstellung und tritt bei Läsion des ulnopalmaren und lunotriquetralen Bandapparates auf. (Towfigh et al. 2011, Hoffmann 2009) Zu beachten ist, dass die Winkel lediglich einen Hinweis auf Pathologien geben, für sich allein genommen jedoch nicht beweisend sind (Vogt 2011). Beispielsweise kann durch Ulnarduktion eine DISI- und durch Radialduktion eine PISI-Fehlstellung vorgetäuscht werden (Hoffmann 2009). Kommt es aufgrund der Instabilität zur palmaren Abkipfung des Scaphoids (Taleisnik 1988, Watson et al. 1988), kann dies in der a.p. (anterior posterioren) Projektion dargestellt werden (Weber et al. 2006). Dabei stellt sich der distale Scaphoidpol als runde Struktur im Os scaphoideum dar. Man bezeichnet dies als Siegelringzeichen. (Weber et al. 2006, Daffner et al. 1992) „Der radiologische Nachweis einer Aufweitung des SL-Spaltes > 4 mm und einer Palmarverkipfung des Skaphoids mit Siegelringzeichen weist nach entsprechender Verletzung auf eine akute SL-Bandruptur hin. [...] Eine statische Deformität kann anhand der Aufweitung des SL-Spaltes, des Siegelringzeichens und des erhöhten skapholunären Winkels

von $> 60^\circ$ in der seitlichen Projektion leicht erkannt werden. Die wesentlich häufigere dynamische Instabilität kann hingegen nur diskrete Veränderungen aufweisen und daher leicht übersehen werden. Typisch für eine dynamische Instabilität ist, dass eine spontane Reponierbarkeit des Scaphoids durch eine ulnare Abduktion besteht“ (Martini et al. 2011). Die Messung des scapholunären Spalts erfolgt in der Mitte von Scaphoid und Lunatum (Schimmerl-Metz et al. 1999).

2.4.3 Stressaufnahmen

„Stressaufnahmen werden angefertigt, um das Ausmaß einer statischen Instabilität und einer dynamischen Instabilität darzustellen“ (Towfigh et al. 2011). Es können Aufnahmen in Ulnarduktion, Radialduktion sowie Palmar- und Dorsalflexion des Handgelenkes durchgeführt werden (Vogt 2011). Laut Towfigh et al. hat sich die Aufnahme in d.p. oder p.d. Projektion mit festem Faustschluss bzw. Umgreifen eines Balles in Ulnarduktion, der sogenannten „Stecker-Aufnahme“, zum Nachweis einer SL-Dissoziation bewährt (Towfigh et al. 2011). Hinweis auf eine Bandruptur ist die Erweiterung des SL-Spalt von 2 mm in Ruhe auf über 4 mm bei Stressaufnahmen, was als „Terry Thomas Zeichen“ bezeichnet wird (Towfigh et al. 2011, Schmitt et al. 2015, Megerle und Machens 2015). Eine weitere Projektion zur Beurteilung stellt die Aufnahme nach Moneim dar. Hierbei werden Ring- und Kleinfinger bei leichter Ulnarduktion des Handgelenks in die Faust eingeschlagen, wohingegen die anderen Finger gestreckt bleiben. Dadurch gelingt eine überlagerungsfreie Darstellung des SL-Spalt. (Bickert und Kneser 2015)

2.4.4 Kinematographie

Im Rahmen der Kinematographie können dynamische Instabilitäten unter dem Bildwandler objektiv dargestellt und beispielsweise eine SL-Dissoziation bei Faustschluss sichtbar gemacht werden (Towfigh et al. 2011). Bickert und Kneser empfehlen das Durchbewegen des Handgelenks unter dem Bildwandler „am Ende jeder Osteosynthese des distalen Radius zum Ausschluss einer begleitenden relevanten Bandverletzung“ (Bickert und Kneser 2015).

2.4.5 Magnetresonanztomographie

Die Magnetresonanztomographie kommt vorrangig zur Darstellung der Weichteile, der Synovialis, des hyalinen Knorpels, Knochenmarks und bei knöchernen Veränderungen mit Ödemen zur Anwendung. Hauptindikation ist somit auch die Darstellung ligamentärer Verletzungen. (Vogt 2011, Towfigh et al. 2011) In der nativen MRT können „karpale Bandrupturen nur dann sicher bewertet werden, wenn die rupturierten Bandsegmente von einer hyperintensiven Flüssigkeit umgeben sind“ (Towfigh et al. 2011). Durch intravenöse Applikation von Kontrastmittel kann die Darstellung eventuell verbessert werden (Towfigh et al. 2011). Für die Darstellung des Handgelenks kommen Geräte ab 1,5 Tesla (T) und spezielle Handgelenksspulen zum Einsatz (Bickert und Kneser 2015).

2.4.6 Magnetresonanz-Arthrographie

Towfigh beschreibt die MR-Arthrographie als den Goldstandard zur Darstellung der karpalen Bänder. Durch direkte Injektion des Kontrastmittels in den Gelenkraum gelingt eine bessere Abgrenzung der intraartikulären Bänder vom hyalinen Knorpel. (Towfigh et al. 2011)

2.4.7 Computertomographie

Die Computertomographie spielt vor allem in späten Stadien der Handgelenksinstabilität bei Vorliegen von arthrotischen Veränderungen eine Rolle und hat als CT-Arthrographie einen hohen, der MR-Arthrographie vergleichbaren, diagnostischen Stellenwert (Prommersberger et al. 2014). Im Rahmen von karpalen Frakturen stellt sie „das beste weiterführende diagnostische Verfahren dar“ (Bickert und Kneser 2015).

2.4.8 Arthroskopie

Die Handgelenksarthroskopie gilt als diagnostischer Goldstandard bei karpalen Verletzungen und ermöglicht das frühzeitige Erkennen und Einstufen einer Instabilität bei Verletzung des SL-Bandes (Vogt 2011, Towfigh et al. 2011, Hoffmann 2009, Prommersberger et al. 2014, Megerle und Machens 2015). „Vorteil der Arthroskopie ist die Möglichkeit, viele Befunde direkt arthroskopisch therapieren bzw. bei frischen Bandverletzungen in gleicher Anästhesie offen versorgen zu können“ (Bickert und Kneser 2015).

2.5. Therapeutische Optionen

2.5.1 Indikationen

Eine Therapie ist bei SL-Dissoziation immer indiziert. Ziel ist die möglichst anatomische Rekonstruktion. Abhängig von Ausmaß und Alter der Dissoziation ergeben sich verschiedene therapeutische Optionen. Prinzipiell sollte die Indikation zur operativen Versorgung großzügig gestellt werden. (Towfigh et al. 2011)

2.5.2 Behandlungsalgorithmus

Abbildung 16 zeigt einen Behandlungsalgorithmus der scapholunären Bandläsion nach Prommersberger (Prommersberger et al. 2014).

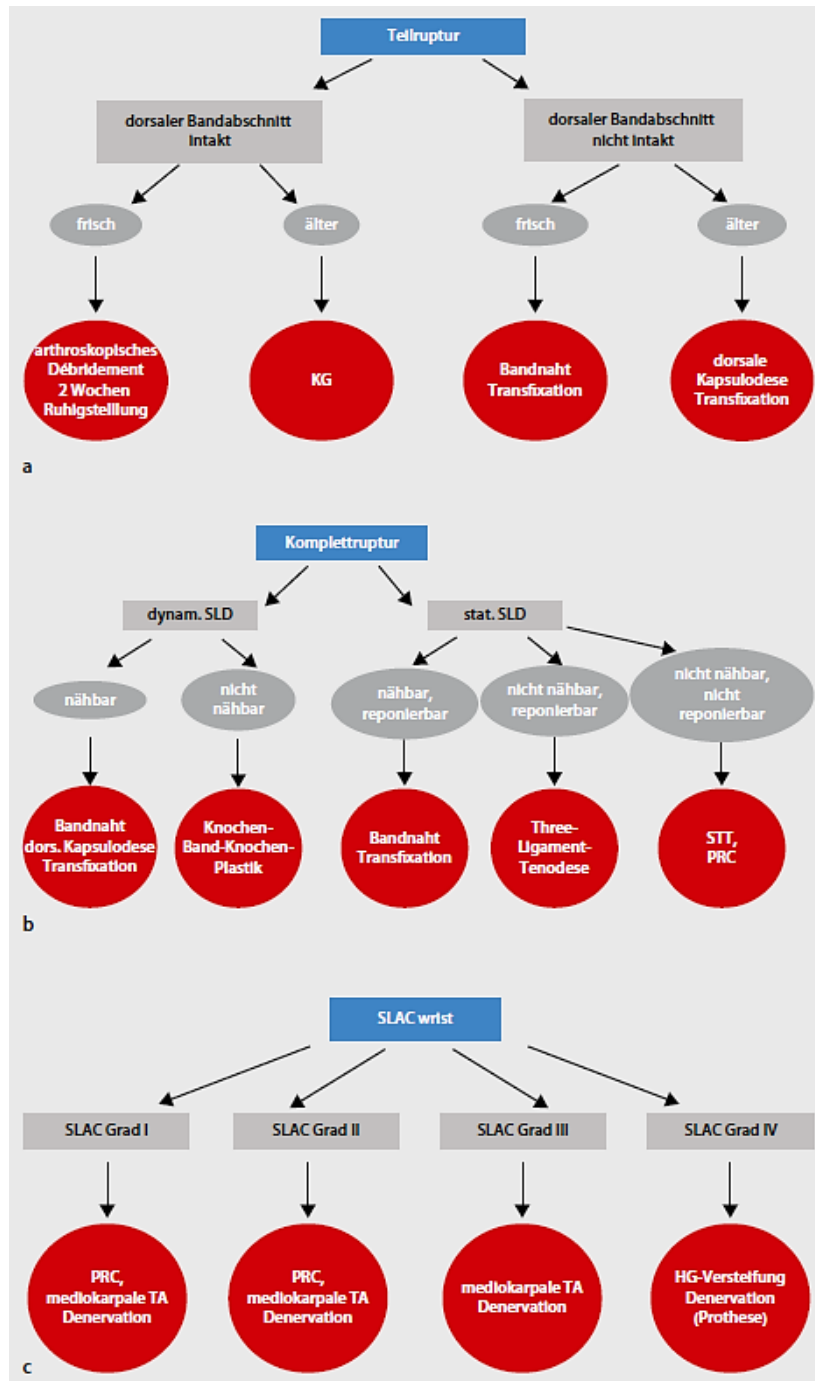


Abbildung 16: Algorithmus der Therapie der scapholunären Bandläsion; HG Handgelenk, KG Krankengymnastik, PCR proximal row carpectomie, TA Teilarthrodese, STT Gelenk zwischen Scaphoid, Trapezium und Trapezoideum (modifiziert aus Prommersberger et al. 2014)

2.5.3 Frische scapholunäre Verletzung

Eine frische Verletzung liegt bis sechs Wochen nach Ereignis vor. Abhängig vom Ausmaß der Dissoziation können verschiedene Verfahren gewählt werden. Die folgenden Gradeinteilungen beziehen sich auf Stadieneinteilung der scapholunären Dissoziation (siehe Abbildung 11). Bei SLD-Grad I kann eine konservative Therapie mit Immobilisation für sechs Wochen im Scaphoidgips versucht werden. Bessere Ergebnisse werden jedoch durch offene Reposition mit Bandnaht und anschließender Ruhigstellung im Unterarmgips erzielt. SLD-Grad II und III Verletzungen sollten offen reponiert werden und mittels intraossärer Bandnaht und Kirschner-Draht-Fixation versorgt werden. Anschließend erfolgt eine Ruhigstellung für 6-8 Wochen im Scaphoidgips. (Towfigh et al. 2011)

Frank et al. unterscheiden die Therapieoptionen anhand des arthroskopischen Grades der scapholunären Dissoziation nach Geissler (siehe Tabelle 3 Seite 18). Bei 1.- und 2.-gradigen Verletzungen sind konservative Verfahren und arthroskopisch gestützte thermoplastische Verfahren möglich. 3.- und 4.-gradige Läsionen sollen anatomisch reponiert, mittels Kirschner-Drähten fixiert und sechs bis acht Wochen ruhiggestellt werden. (Frank et al. 2015) Eine Bandnaht oder –verstärkung ist bei 5.-gradigen Läsionen neben der Transfixation indiziert (Frank et al. 2015, Slutsky und Trevare 2014, Szabo 2008).

2.5.4 Veraltete scapholunäre Verletzung

Veraltete Läsionen liegen per Definition nach 6 Wochen vor. Abhängig von der Reponierbarkeit ergeben sich unterschiedliche Optionen. Bei nicht fixierten und somit reponiblen SL-Band-Verletzungen kann eine anatomische Rekonstruktion mittels Bandnaht erfolgen. Aufgrund von inkonstanten Ergebnissen sollte diese durch eine dorsale Kapselplastik oder distale Aufhängung des Scaphoids nach Brunelli verstärkt werden. Bei jungen, handwerklich aktiven Patienten sollte eine Teilarthrodese erwogen werden, um sekundärarthrotischen Veränderungen vorzubeugen.

Liegt eine fixierte und somit nicht reponible SL-Band-Verletzung vor, finden sich osteoarthrotische Veränderungen. Abhängig von der Lokalisation dieser sind partielle oder totale Arthrodesen indiziert. Ältere, handwerklich nicht aktive Patienten profitieren eventuell von einem totalendoprothetischen Handgelenkersatz. (Towfigh et al. 2011, Frank et al. 2015, Luegmair und Saffar 2013, Obdeijn et al. 2013, Megerle und Machens 2015, Kalb und Prommersberger 2009, Prommersberger et al. 2014) Zur rein symptomatischen Beschwerdereduktion kann eine Durchtrennung nozizeptiver Nerven erfolgen (Megerle und Machens 2015).

3. Ziele der Arbeit

In der Beurteilung von Verletzungen der intrinsischen carpalen Bänder ist der Ultraschall noch nicht etabliert. Dies wird dadurch verdeutlicht, dass die Darstellung des dorsalen SL-Bandabschnitts zwar in 90 % der Fälle gelingt, aber eine fehlende Darstellung keine Bandruptur beweist und somit die Sonographie in der Diagnostik bislang keine Rolle spielt (Davis und Blankenbaker 2010, Taljanovic et al. 2008, Prommersberger et al. 2014, Henderson et al. 2015, Ramamurthy et al. 2016).

Ziel dieser Arbeit war es, ein standardisiertes Untersuchungsverfahren für die Sonographie zur Darstellung und Kriterien zur Beurteilung des scapholunären Bandes zu entwickeln. Dafür wurden folgende Ziele postuliert:

1. Es soll die sichere Darstellung des scapholunären Bandes bei Gesunden im Ultraschall gelingen.
2. Bei Verletzung des scapholunären Bandes soll das bildmorphologische Korrelat im Ultraschall dargestellt werden.
3. Es sollen Kriterien zur Beurteilung der Integrität des scapholunären Bandes erarbeitet werden, um eine Läsion diagnostizieren zu können.

Dadurch ergab sich die Forschungsfrage:

Welche mittels Sonographie an der betroffenen Hand sowie der Gegenseite erhobenen Merkmale, in Bezug auf Darstellbarkeit und Abstand, erlauben eine Aussage zum Status (intakt oder verletzt - durch etablierte Diagnostika (MRT, Arthroskopie, (Operation)) verifiziert) des scapholunären Bandes bei den (im Zeitraum 2013-2016) untersuchten Patienten und Probanden?

4. Methodik

Die Untersuchung und Datenerhebung erfolgte im BG Klinikum Bergmannstrost Halle in Zusammenarbeit mit der Klinik für Plastische und Handchirurgie und Brandverletztencentrum sowie der Klinik für bildgebende Diagnostik und Interventionsradiologie im Zeitraum 2013 bis 2016.

4.1. Hypothesen

Zur Beantwortung der Forschungsfrage erfolgte die Aufteilung in mehrere Unterfragen, aus welchen entsprechende Hypothesen abgeleitet wurden:

Ist ein tatsächlich intaktes SL-Band (geprüft mittels MRT, Arthroskopie, Operation) sonographisch nicht immer als solches darstellbar?

Hypothese 1: Bei Vergleich aller gesunden Hände mit denen, welche eine SL-Bandverletzung aufweisen, stellt eine hyperechogene, parallelfaserige, durchgängige Struktur in der Sonographie ein intaktes Band dar.

Wie reliabel (zuverlässig) ist die Sonographie als Darstellungsmethode für das SL-Band verglichen mit den anderen Methoden (MRT, Arthroskopie, Operation)?

Hypothese 2: Bei allen Patienten stimmt die sonographische Darstellung des SL-Bandes – unabhängig ob durchgängig darstellbar oder nicht darstellbar – mit den anderen Methoden überein.

Gibt es Unterschiede im sonographischen Vergleich der rechten und linken Hand (betroffene und Gegenseite) in Bezug auf die Darstellbarkeit bei vorliegender Verletzung und bei intaktem SL-Band?

Hypothese 3: Vergleicht man die sonographische Darstellbarkeit von rechter und linker Hand eines Individuums, lässt sich das Band bei Verletzung auf der betroffenen Seite nicht und auf der gesunden Seite normal darstellen, bei intaktem Band findet sich entsprechend auf beiden Seiten eine regelhafte Darstellung.

Stimmt der gemessene scapholunäre Abstand von Sonographie und MRT überein?

Hypothese 4: Die scapholunären Abstände am entsprechenden Messpunkt (dorsal, Mitte, palmar) stimmen zwischen MRT und Sonographie der betroffenen Seite bei allen Patienten überein.

Unterscheiden sich die sonographisch gemessenen Abstände im Seitenvergleich entsprechend der Diagnose?

Hypothese 5: Der sonographisch ermittelte scapholunäre Abstand in allen Messpunkten (dorsal, Mitte, palmar) ist für die gesunde Gegenseite im Vergleich zur betroffenen bei allen Patienten mit Verletzung geringer und bei intaktem Band gleich.

Sind die sonographisch gemessenen Abstände abhängig davon, ob eine Komplet- oder Teilruptur vorliegt oder können diese zusammen unter dem Überbegriff Läsion betrachtet werden?

Hypothese 6: Die sonographisch gemessenen Abstände von Komplet- und Teilruptur unterscheiden sich nicht.

Lassen sich die physiologischen Abstandsunterschiede bei Ulnarduktion und Radialduktion im Ultraschall korrekt nachvollziehen?

Hypothese 7: Unabhängig ob eine Verletzung vorliegt oder nicht, nimmt bei allen Patienten mit vorhandenen Funktionsaufnahmen der SL-Abstand bei Radialduktion ab und bei Ulnarduktion zu.

Zeigen die Funktionsaufnahmen eine SL-Dissoziation bei Verletzung an?

Hypothese 8: Bei Verletzung nimmt die Abstandsdifferenz zwischen Ulnarduktion und Radialduktion im Vergleich zur Gegenseite im Sinne einer SL-Dissoziation zu.

Gibt es einen Cut-off-Wert des sonographisch gemessenen SL-Abstands, der eine Verletzung anzeigt?

Hypothese 9: Wenn sich die Abstände in der Sonographie von betroffener und Gegenseite unterscheiden, gibt es einen Schwellenwert/Cut-off-Wert, ab dem mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit eine Verletzung vorliegt.

4.2. Patienten und Probanden

Die Rekrutierung der Patienten bzw. Probanden erfolgte im Zeitraum 2013 bis 2016. Diese stammen aus dem Patientenkollektiv des BG Klinikum Bergmannstrost beziehungsweise sind im Falle der Probanden Teilnehmer aus der Klinik. Ein positives Ethikvotum der Ethik-Kommission der Medizinischen Fakultät der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg liegt vor (Anhang Seite IX).

In Abbildung 17 wird die Geschlechter- und Altersverteilung aller in die Studie eingeschlossenen Teilnehmer dargestellt. Es wurden 30 männliche und 10 weibliche Individuen untersucht. Der Altersmittelwert beträgt 43,57 und der Median 44 Jahre.

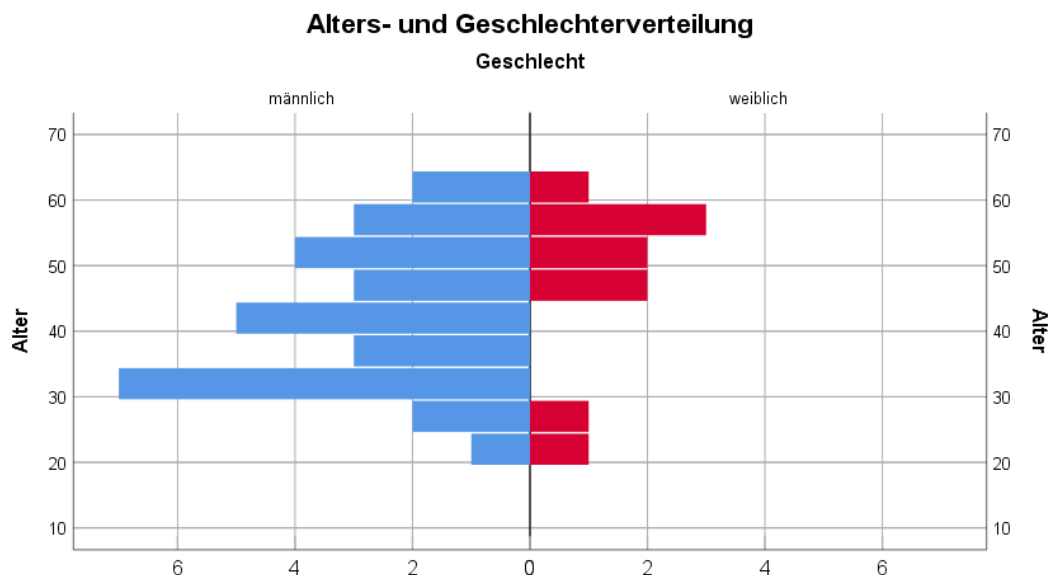


Abbildung 17: Alters- und Geschlechterverteilung aller Studienteilnehmer

Für die systematische Herangehensweise an die Thematik wurden drei vorab definierte Gruppen gebildet.

Gruppe 1 bestand aus 10 gesunden Probanden aus dem Mitarbeiterpool der Klinik sowie zwei freiwilligen Privatpersonen. Diese Probanden erhielten eine MRT Untersuchung eines Handgelenkes und anschließend eine Sonographie derselben Hand zur Darstellung des SL-Bandes. Voraussetzung beziehungsweise Einschlusskriterium war, dass bisher keine traumatische Verletzung der Hand vorlag (Tabelle 5). Grundlage dieser Gruppe war es, die Intaktheit des scapholunären Bandes im MRT zu sichern. Mit der folgenden Sonographie sollte geprüft werden, ob eine Darstellung des intakten Bandes möglich ist.

Einschlusskriterien	Ausschlusskriterien
<ul style="list-style-type: none"> - anamnestisch kein Trauma der Hand - Nachweis eines intakten SL-Bandes im MRT 	<ul style="list-style-type: none"> - Trauma der Hand - SL-Dissoziation oder Ruptur des SL-Bandes im MRT sichtbar - Alter unter 18 Jahren

Tabelle 5: Ein- und Ausschlusskriterien Gruppe 1

In Gruppe 2 wurde eine Größe von 10 Patienten eingeschlossen, bei denen eine SL-Bandruptur beziehungsweise scapholunäre Dissoziation durch vorab durchgeführte Diagnostik gesichert wurde. Tabelle 6 zeigt die Ein- und Ausschlusskriterien. Die Patienten erhielten nach positiver Diagnosestellung eine Sonographie der betroffenen Hand und der Gegenseite. Damit sollte das bildmorphologische Korrelat einer Läsion im Ultraschall dargestellt werden und ein Vergleich zur gesunden Gegenseite erfolgen.

Einschlusskriterien	Ausschlusskriterien
<ul style="list-style-type: none"> - Nachweis SL-Dissoziation in der Bildgebung - Nachweis SL-Ruptur in der Bildgebung - Nachweis SL-Ruptur in der Arthroskopie oder Operation 	<ul style="list-style-type: none"> - fehlende Einwilligung - SL-Läsion nicht abschließend diagnostiziert - fehlende Daten/Bilder - Alter unter 18 Jahren

Tabelle 6: Ein- und Ausschlusskriterien Gruppe 2

Gruppe 3 diente dazu, einen einheitlichen Untersuchungsablauf zu entwickeln, das Verfahren um spezielle Abläufe zu erweitern und die in der weiteren Bildgebung gewonnenen Informationen im Ultraschall zu verifizieren. Infolgedessen sollten Aussagen getroffen werden, ob in der Sonographie des SL-Bandes eine Läsion diagnostiziert und ob diese durch die vorige Diagnostik bestätigt werden konnte. Für die Gruppe 3 wurden Patienten gewählt, bei denen aufgrund der Anamnese und klinischen Untersuchung eine SL-Verletzung anzunehmen war bzw. differentialdiagnostisch abgeklärt werden sollte (Tabelle 7). Im Rahmen der normalen Diagnostik und Behandlung wurden für den Patienten jeweils individuell geeignete bildgebende Verfahren eingesetzt, um eine Läsion zu detektieren. Die Rekrutierung der Studienteilnehmer und Durchführung der Sonographie erfolgte zu unterschiedlichen Zeitpunkten innerhalb des Behandlungsablaufs. Möglich war eine Vorstellung der Patienten in der Ambulanz ohne bereits erfolgte Bildgebung aufgrund von Beschwerden im Bereich des Handgelenks, woraufhin eine Diagnostik veranlasst wurde. Alternativ konnte mit bereits vorhandener Bildgebung eine Auswertung und Weiterbehandlung erfolgen. Weiterhin konnte eine stationäre Behandlung zur operativen Versorgung oder arthroskopischen Diagnostik stattfinden.

Einschlusskriterien	Ausschlusskriterien
<ul style="list-style-type: none"> - MRT zeigt SL-Bandruptur oder SL-Dissoziation - Röntgen/Funktionsaufnahmen zeigen SL-Dissoziation - Arthroskopie wird zur Diagnostik durchgeführt - Arthroskopie zeigt SL-Bandruptur - operative Versorgung einer bekannten SL-Dissoziation/-Bandruptur geplant 	<ul style="list-style-type: none"> - fehlende Einwilligung - keine adäquate Diagnostik (MRT, Arthroskopie) zur Diagnosesicherung vorhanden - Alter unter 18 Jahren

Tabelle 7: Ein- und Ausschlusskriterien Gruppe 3

4.3. Allgemeine Definitionen

Werden rechte und linke Hand eines Individuums miteinander verglichen, wird im Folgenden von betroffener Seite und Gegenseite gesprochen. Hierbei stellt die betroffene Seite die Hand mit der klinischen Symptomatik dar, welche Anlass zur weiteren Diagnostik gab. Es ist dabei unerheblich, ob letztendlich eine Verletzung diagnostiziert wurde oder ein intaktes Band vorlag. Die gegenseitige Hand wurde, insofern keine Anamnese zu einem Trauma vorliegt, als gesund gewertet.

4.4. Sonographie

4.4.1 Technische Grundlagen

Die Sonographie stellt ein Schnittbildverfahren dar, bei dem über den piezoelektrischen Effekt Ultraschallwellen erzeugt werden. Diese werden im Gewebe reflektiert und vom Gerät wieder detektiert. Abhängig von der Schwächung der Ultraschallwellen aufgrund von Absorption, Reflexion, Brechung, Streuung und Divergenz entsteht ein (vom Gerät erzeugtes) zweidimensionales Bild (Abbildung 18). Dabei ist zu beachten, dass mit steigender Frequenz die Ortsauflösung zu- und die Eindringtiefe abnehmen. Je oberflächlicher die zu untersuchende Struktur liegt, desto höher muss die Frequenz gewählt werden. (Reiser et al. 2011)

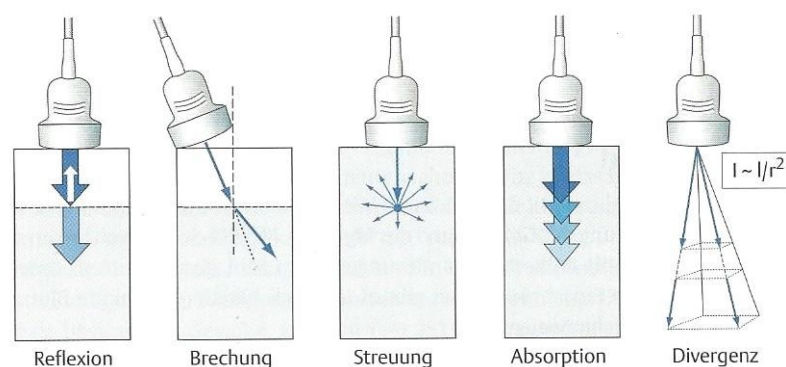


Abbildung 18: Ursachen der Schallabschwächung (modifiziert aus Reiser et al. 2011)

Das Ausmaß von Reflexion und Brechung hängt von der unterschiedlichen Schallleitungsfähigkeit (akustische Impedanz) der Gewebe ab. So bestehen große Impedanzunterschiede zwischen Luft und Knochen, wodurch nahezu alle Ultraschallwellen reflektiert werden und eine dahinter liegende Schallauslöschung resultiert. Luft und Knochen stellen sich im Ultraschall hell dar. Flüssigkeiten dagegen erscheinen dunkel und führen zu einer dorsalen Schallverstärkung (Abbildung 19). (Reiser et al. 2011)

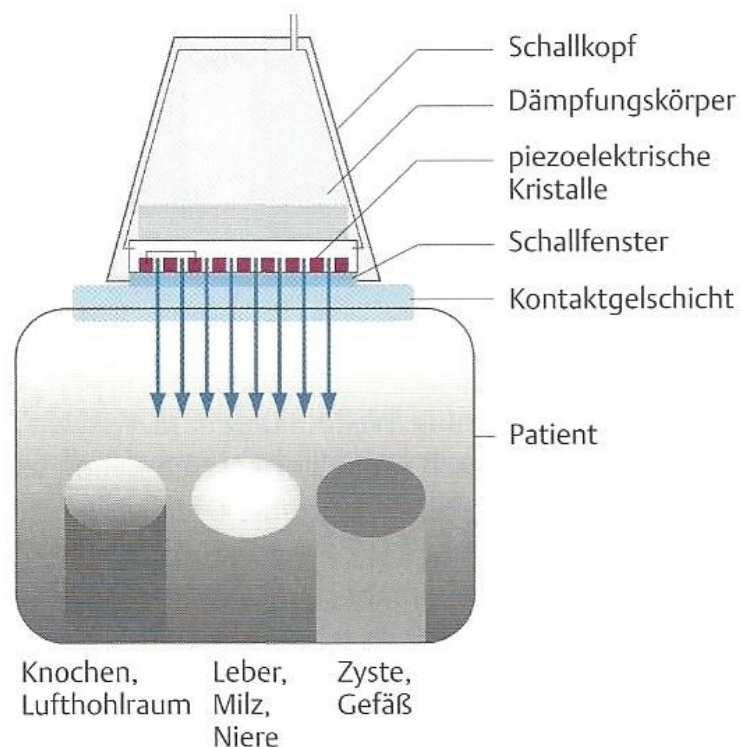


Abbildung 19: Funktionsweise der Sonographie (modifiziert aus Reiser et al. 2011)

Werden Sehnen oder Bänder nicht orthograd getroffen, können echoarme Bereiche als Anisotropie-Artefakte, insbesondere am Knochenansatz, auftreten und fälschlicherweise eine Diskontinuität vortäuschen (Sattler und Harland 1988, Sattler und Rehart 1997).

4.4.2 Untersuchungsgerät

Ein Ultraschallgerät besteht aus mindestens einem Schallkopf (Applikator), der die Piezokristalle enthält, und einer Steuereinheit, welche die Piezokristalle ansteuert und die empfangenen Echos auf einem Monitor darstellt. Je nach Fragestellung und zu untersuchendem Organ werden verschiedene Schallkopfarten verwendet (Abbildung 20). (Reiser et al. 2011)

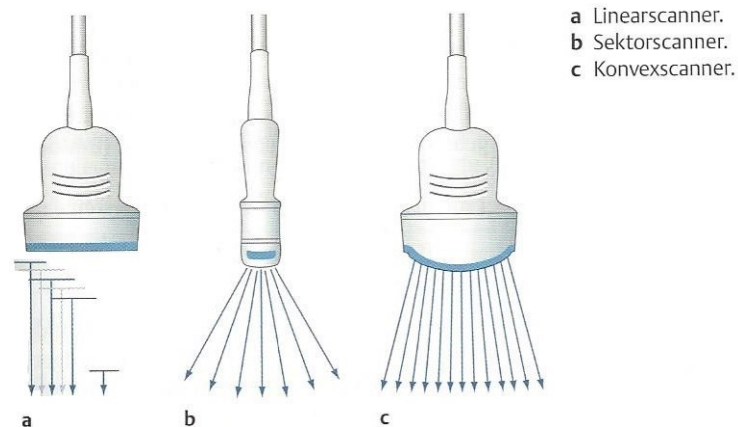


Abbildung 20: Schallkopfarten (modifiziert aus Reiser et al. 2011)

Im Rahmen der Studie wurde folgendes Ultraschallgerät verwendet (Abbildung 21): iU22, Philips GmbH, Baujahr 2011



Abbildung 21: Zur Untersuchung verwendetes Ultraschallgerät

Als Schallkopf kommt ein Linearscanner im Frequenzbereich 5-17 MHz zum Einsatz (Abbildung 22). Linearscanner enthalten mehrere nebeneinander angeordnete Piezokristalle, wodurch ein rechteckiges Schallfeld und Bild entsteht, welches sich durch annähernd gleich bleibende Bildqualität in der Tiefe auszeichnet. Hochfrequente Linearscanner werden üblicherweise zur Darstellung oberflächlicher Strukturen wie der Schilddrüse, Mamma, Muskulatur oder Halsgefäße eingesetzt. (Reiser et al. 2011)



Abbildung 22: 5-17 MHz Linearschallkopf für die Untersuchung

4.4.3 Standardisierter Untersuchungsablauf

Im Folgenden wird der Untersuchungsablauf zur sonographischen Darstellung des scapholunären Bandes beschrieben. Nach Patientenaufklärung und Studieneinwilligung wird am Untersuchungsgerät nach Eingabe der Patientendaten der L17-5 MHz Schallkopf mit der Einstellung „Bewegungsapparat oberflächlich“ ausgewählt. Es wurde definiert, dass unabhängig von rechter oder linker Hand sowie palmar oder dorsal, der rechte Bildabschnitt immer radial und der linke somit ulnar darstellt. Durch diese Festlegung befindet sich das Scaphoid somit rechts. Bilder werden in einem sogenannten „Loop“ (Schleife, kurzes Video) aufgezeichnet, um der Sonographie als dynamische Untersuchung gerecht zu werden und dadurch die Beurteilbarkeit zu verbessern. Es werden Einzelaufnahmen in bestimmten Positionen erstellt.

Die Untersuchung beginnt dorsalseitig zur Darstellung des hinteren SL-Bandanteils in der Transversalebene. Die Hand des Patienten wird auf einem Kissen in leichter Palmarflexion gelagert. Dies wird in der folgenden Betrachtung als „Neutralstellung“ bezeichnet. Der Schallkopf wird auf den distalen Radius etwas proximal des Handgelenkes aufgesetzt, langsam nach distal bewegt und das Tuberculum listeri als anatomische Landmarke mittig im Bild eingestellt. Von dort wird der Schallkopf dezent nach distal und ulnar bewegt. Dadurch „rutscht“ man in den Gelenkspalt des Handgelenkes, wodurch Scaphoid und Lunatum mit dem zugehörigen Band zur Darstellung gelangen. Aufgrund der Neigungswinkel der Gelenkflächen (Abbildung 3) wird der Schallkopf entsprechend gedreht (Abbildung 23 a)). Am Gerät können Feineinstellungen für Kontrast, Tiefe, Gain, Fokus und Zoom vorgenommen werden. Der Schallkopf kann im Folgenden abwechselnd 5 bis 10 Grad nach proximal und distal gekippt werden, um die richtige Schnittebene für die Darstellung des Bandes zu finden (Abbildung 23 b)). Bei diesem Schritt wird ein Loop aufgezeichnet. Anschließend bittet man den Patienten, soweit dies möglich ist, die Hand in Ulnar- und Radialduktion zu bringen und die Position zu halten. Es werden jeweils Loops aufgezeichnet. Danach führt der Patient diese Bewegungen langsam und kontinuierlich durch, wobei ausgehend von der Mittelstellung die Aufzeichnung eines (oder mehrerer) Videos erfolgt. Dies dient der Beurteilung der Stabilität des SL-Bandes und zur Aufdeckung einer etwaigen SL-Dissoziation. Dabei muss unbedingt darauf geachtet werden, die Handwurzelknochen im Bild zu halten und mittig zu fokussieren. Anschließend erfolgt die Darstellung des palmaren SL-Bandanteils. Hierzu dreht der Patient die Hand und legt sie in leichter Dorsalextension auf das Kissen. Analog zu Dorsalseite wird der Schallkopf proximal vom Handgelenk auf den Radius aufgesetzt und langsam distal bewegt, bis Scaphoideum und Lunatum erscheinen. Auch hier wird der Applikator entsprechend der Gelenkflächenneigungswinkel gedreht (Abbildung 24). Analog der vorigen Vorgehensweise, werden sowohl in dieser Position als auch bei Radial- und Ulnarduktion sowie beim langsamen Durchbewegen Aufzeichnungen vorgenommen.

a)



b)



**Abbildung 23: a) Positionierung Hand und Schallkopf dorsal in Neutralstellung
b) Position Schallkopf dorsal, exemplarisch gekippt zur Veränderung der Schallebene**



Abbildung 24: Positionierung Hand und Schallkopf palmar

Für die spätere Orientierung und Auswertung werden zu jedem Schritt Beschriftungen zu Seite, Stellung und Position des Schallkopfes (dorsal, palmar) eingefügt. Tissue harmonic imaging (THI) wurde für jede Position zusätzlich durchgeführt. Der geschilderte Ablauf wurde für die betroffene Seite und die gegenseitige Hand durchgeführt.

4.4.4 Beurteilung Darstellbarkeit

Eine hyperechogene, parallel strukturierte Formation zwischen den Ossa scaphoideum und lunatum, die sich durchgängig darstellt, wurde als SL-Band mit dem Status „darstellbar“ gewertet (Abbildung 25). Durch verschiedene Schnittebenen und – winkel wurde versucht, das Band in der Gesamtheit darzustellen und dem Effekt der Anisotropie entgegenzuwirken (Renoux et al. 2009).

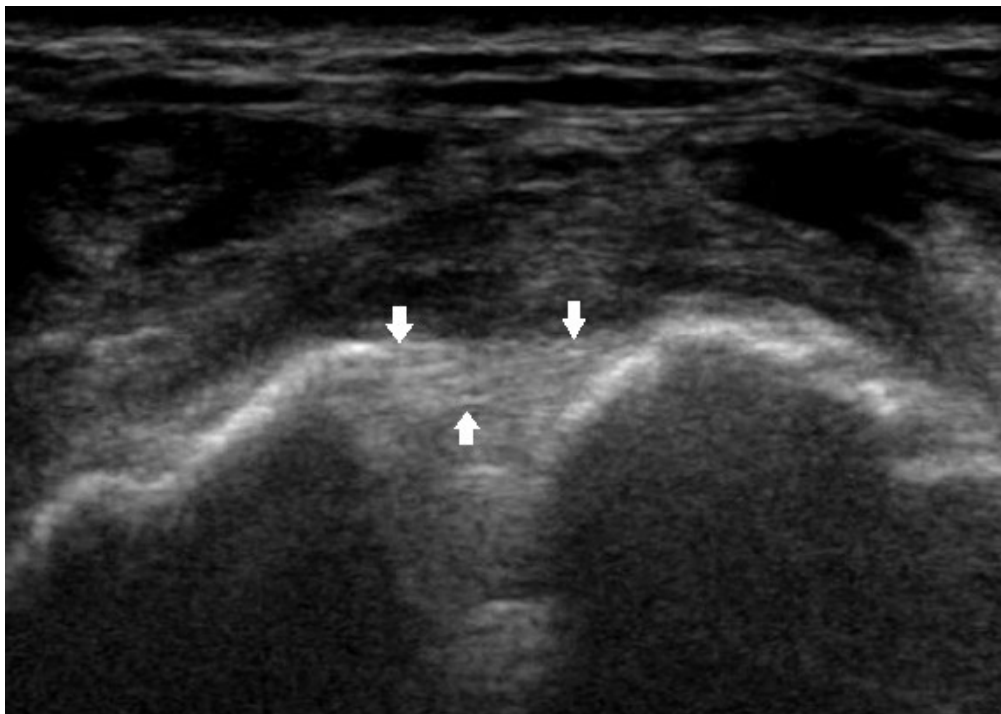


Abbildung 25: Hand rechts dorsal, SL-Band mit Pfeilen markiert

War zwischen den Handwurzelknochen in den verschiedenen Schnittebenen nur eine echoarme bzw. echofreie Zone darstellbar, erfolgte die Wertung als „nicht darstellbar“ (Abbildung 26). War das Band nicht durchgängig, zum Beispiel im Sinne von Bandstümpfen, zu sehen, erfolgte eine analoge Bewertung (Abbildung 27).

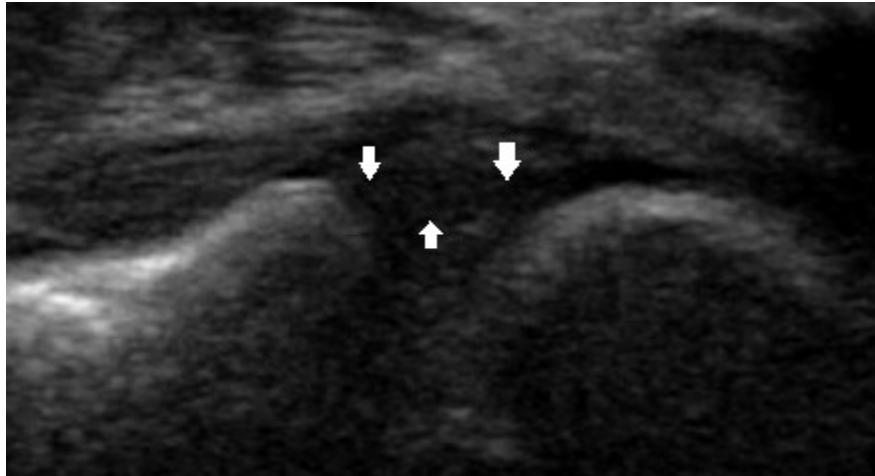


Abbildung 26: Hand rechts dorsal, SL-Band nicht darstellbar

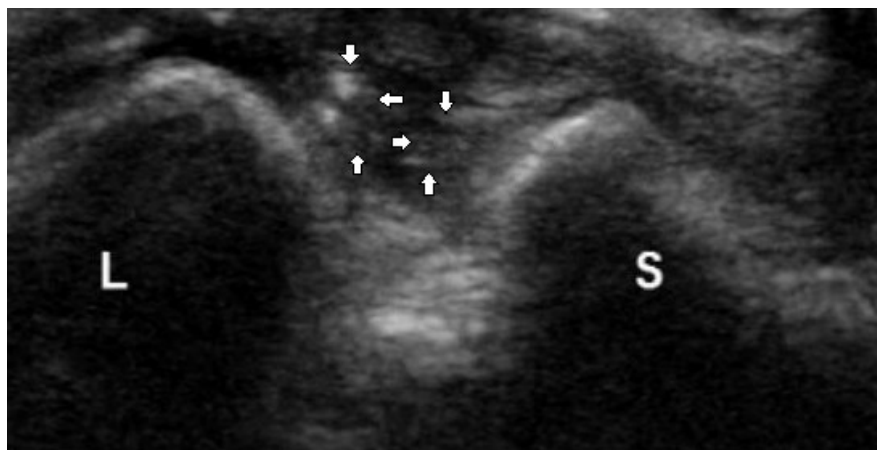


Abbildung 27: Diskontinuierliches SL-Band mit Bandresten bei nachgewiesener Ruptur

4.4.5 Messmethode

Im Rahmen der Beurteilung erfolgt die Messung des SL-Spalt. Dies kann entweder während der Untersuchung über die Messfunktion des Ultraschallgerätes erfolgen oder im Anschluss über die Messfunktion der Software PACS. Für die Datenerhebung der Studie wurde letztere Methode gewählt. Die Messungen erfolgten dorsal und palmar jeweils in Mittelstellung sowie, insofern durchgeführt, in Radial- und Ulnardeviation. Dazu wurde ein geeignetes Einzelbild oder ein Bild aus der Loopsequenz ausgesucht, bei dem Scaphoid und Lunatum dargestellt wurden und der SL-Spalt sichtbar war.

Es wird eine Tangente über die beiden proximalen (sichtbaren) Knochenpole gelegt. Von dieser wird im rechten Winkel ein definierter Abstand von 0,5 mm und 3,5 mm nach unten gemessen. Ausgehend von den Punkten kann der Abstand zwischen den beiden Knochen bestimmt werden. Das Ergebnis gibt die Breite des SL-Spaltes an. Der erste Wert entspricht dabei im Folgenden (in den Messtabellen) der Bezeichnung „dorsal“ und gibt die empirische Position des sonographisch dargestellten scapholunären Bandes an, der zweite dem Wert für „Mitte“. Analog wird bei der palmaren Messung verfahren, wobei hier ein Abstand von 1 mm gewählt wurde. Abbildung 28 veranschaulicht das Messverfahren.

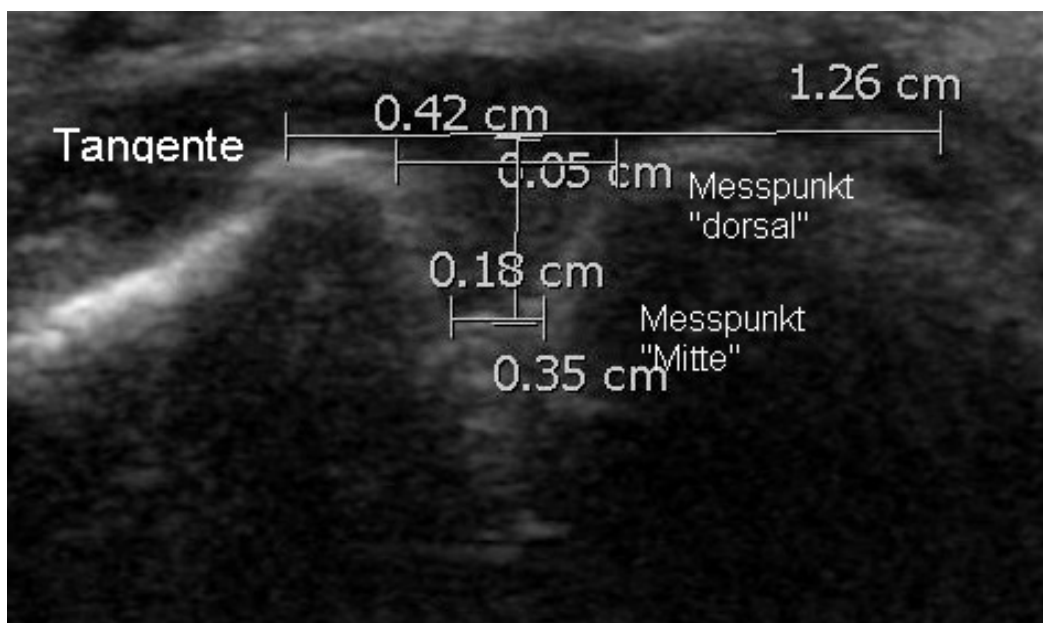


Abbildung 28: sonographische SL-Spaltmessung dorsal mittels PACS-Programm

4.4.6 Untersucher

Die Ultraschalluntersuchung wurde durch Herrn Tino Handschak durchgeführt. Wenn möglich erfolgte dies unter Anwesenheit von Herrn Georgios Tamouridis (Arzt mit Tätigkeit im Bereich Plastische und Handchirurgie).

4.5. Magnetresonanztomographie (MRT)

4.5.1 Technische Grundlagen

Bei der Magnetresonanztomographie werden Schnittbilder in einer beliebigen Ebene ohne Verwendung von Röntgenstrahlen erzeugt. Genutzt wird dabei die physikalische Eigenschaft von Protonen, welche einen Eigendrehimpuls (Kernspin) besitzen und dadurch ein magnetisches Dipolmoment induzieren. Wird ein äußeres Magnetfeld angelegt, bewegen sich die Atomkerne um die Längsachse des Magnetfeldes, was als Präzession bezeichnet wird. Zur Bilderzeugung regt ein Hochfrequenzimpuls die Protonen an. Dies führt zu einer messbaren Quermagnetisierung und Synchronisierung der Präzessionsbewegung. Die Rückkehr in den Grundzustand wird als Relaxation bezeichnet. Dabei wird zwischen einer Längsrelaxation mit der Zeitkonstante T_1 und einer Querrelaxation mit der Zeitkonstante T_2 unterschieden. Zur Darstellung werden mehrere Hochfrequenzimpulse ausgesandt, was als Sequenz bezeichnet wird. Die Helligkeitsunterschiede (Kontrast) der Gewebe sind unter anderem abhängig von den Gewebeparametern T_1 , T_2 und PD (Protonendichte). Bei T_1 -gewichteten Sequenzen stellen sich Fett hyperintens (hell) und Wasser hypointens (dunkel) dar (Abbildung 29). T_2 -gewichtete Sequenzen zeigen Wasser hyperintens (hell) und Gewebe (z.B. Muskulatur) hypointens (dunkel) (Abbildung 29). (Reiser et al. 2011)

In coronalen Schichten bilden sich die dorsalen und volaren Bandkomponenten mit bandförmiger oder trapezoider Konfiguration mit niedriger T_2 Signalintensität in den dicken Anteilen ab. Der proximale Anteil erscheint dreieckförmig. Variationen in der Erscheinung sind beschrieben. (Burns et al. 2011, Ramamurthy et al. 2016)

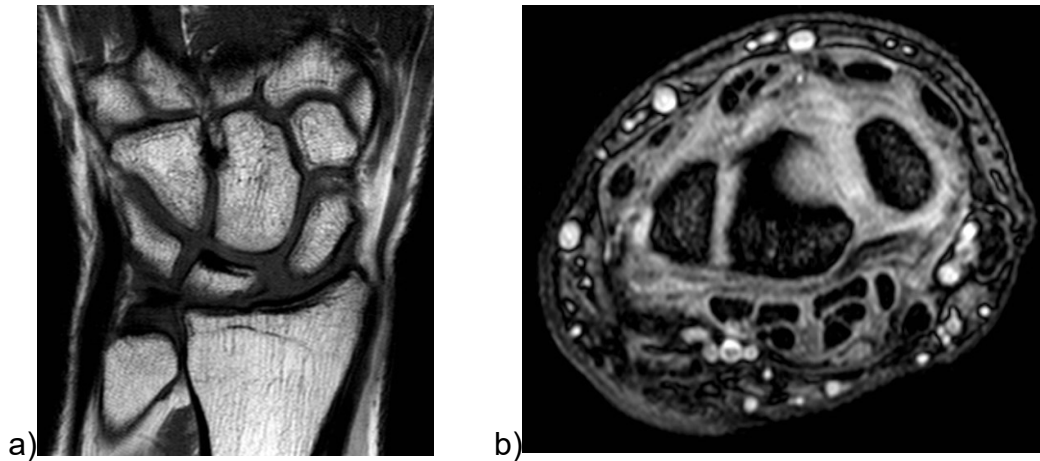


Abbildung 29: a) coronales T1 TSE und b) transversales T2 FFE gewichtetes Bild vom Handgelenk mit SL-Bandruptur

4.5.2 Gerät und Untersuchungsablauf

Im Bergmannstrost wurde folgendes MRT-Gerät verwendet:

- Achieva 1,5 Tesla, Philips GmbH

Weitere Spezifikationen und Patientenlagerung:

- Feldstärke: 1,5 Tesla (T)
- Oberflächenspule mit „In-Center-Lagerung“ der Hand
- Patientenlagerung in Bauchlage, „superman position“ mit extendiertem Ellenbogen über den Kopf (Abbildung 30)



Abbildung 30: Patientenlagerung im Kernspintomograph (aus Lützkendorf 2009)

Das Untersuchungsprotokoll umfasst die folgenden vier Sequenzen mit 2 mm Schichtdicke:

- T1w TSE (Turbo-Spin-Echo) koronal und sagittal,
- STIR (Short-Tau Inversion Recovery) koronal,
- T2w FFE (Fast Field Echo) transversal

Zu auswärtig angefertigten MRT-Bildern des Handgelenks kann bezüglich des Gerätes keine Aussage getroffen werden. Die Auswertung der Bilder erfolgte jedoch analog.

4.5.3 Auswertung

Die Bilder wurden nach Durchsicht ausgewertet, entsprechende Messungen durchgeführt und mit der fachradiologischen Befundung verglichen. Die Messung des scapholunären Abstands erfolgte analog zur sonographischen Vorgehensweise (siehe Sonographie - Messmethode Seite 43). Beispielhaft zeigt Abbildung 31 a) das Bild bei intaktem SL-Band und Abbildung 31 b) bei palmarer Ruptur.

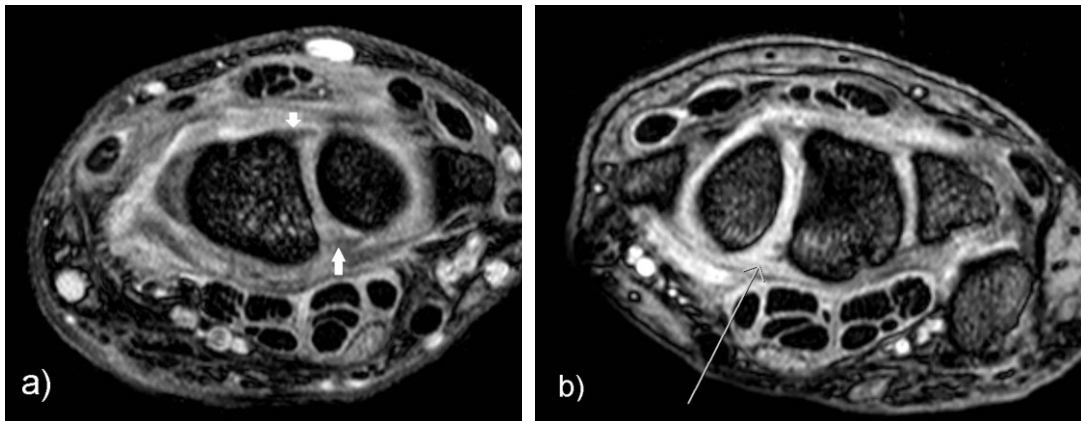


Abbildung 31: a) MRT T2 Sequenz, transversal, intaktes SL-Band (mit Pfeilen markiert), b) MRT T2 Sequenz, transversal, Partialruptur SL-Band palmar (Pfeil)

4.6. Arthroskopie

4.6.1 Technische Grundlagen

Bei der Arthroskopie wird ein Arthroskop über einen invasiven Zugangsweg direkt in den Gelenkraum eingebracht. Mittels Distraction des Handgelenks durch Aufhängung und Gegenzuggewicht, sowie Erweiterung des Gelenkraumes durch Spülflüssigkeit wird die Navigation erleichtert und die Übersicht verbessert. Über einen zweiten Zugang können weitere Instrumentarien wie Tasthaken, Gewebebezangen und Shaver eingebracht werden. (Vogt 2011)

4.6.2 Untersuchungsablauf

Im Folgenden wird nur der Ablauf zur Darstellung und Untersuchung des SL-Bandes beschrieben. Jedoch können und werden bei der Handgelenksarthroskopie auch alle weiteren einsehbaren Strukturen beurteilt. Der Zugang zum Handgelenk erfolgt dorsalseitig über, als Portale bezeichnete, Zugänge. Zur Darstellung des SL-Bandes werden das 3-4-Portal sowie das Mediocarpal-radiale (MCR-) Portal verwendet (Abbildung 32). Das SL-Band wird mittels Tasthaken auf seine Integrität und Straffheit überprüft (Abbildung 32). (Vogt 2011)

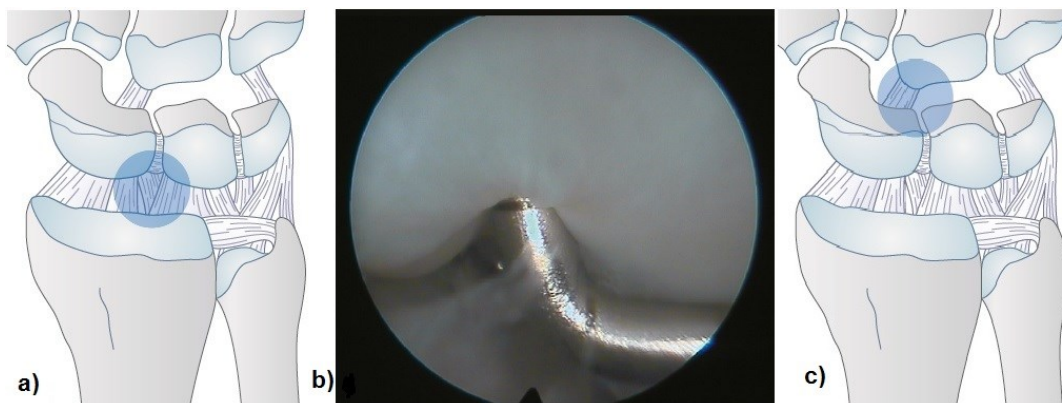


Abbildung 32: a) Untersuchungsgang radiocarpal über das 3-4-Portal b) mit Austasten des SL-Bandes c) Sicht auf den SL-Spalt mediocarpal vom MCR-Portal (modifiziert aus Vogt 2011)

4.6.3 Auswertung

Die Auswertung erfolgte anhand der OP-Berichte in Hinblick auf das Vorliegen einer Ruptur. Abbildung 33 zeigt eine SL-Bandverletzung.

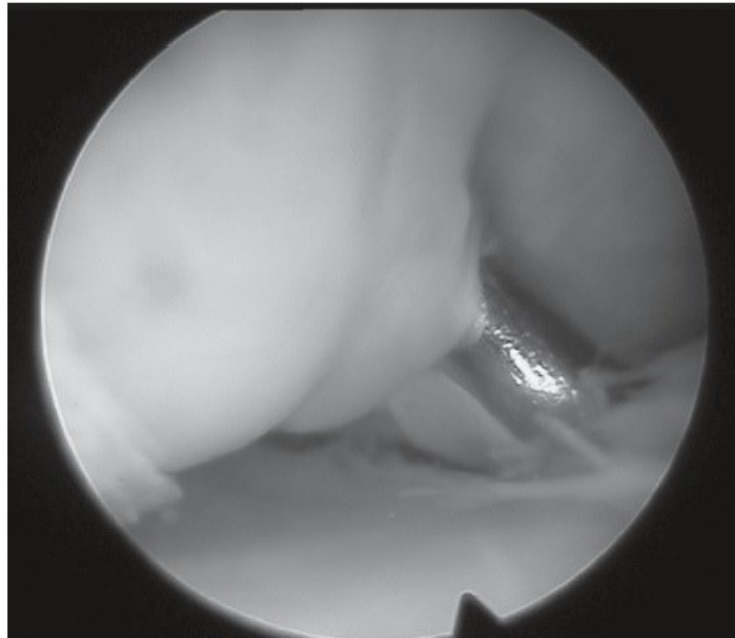


Abbildung 33: SL-Bandverletzung mit ossärer Abscherung des SL-Bandes vom Os lunatum (aus Vogt 2011)

4.7. Röntgen

4.7.1 Technische Grundlagen

Beim Röntgen wird Röntgenstrahlung mittels einer Röntgenröhre erzeugt. Dabei werden aus einer Glühkathode Elektronen durch Anlegen einer Hochspannung in Richtung Anode beschleunigt, wobei nach Auftreffen ca. 1 % in Röntgenbremsstrahlung und 99 % in Wärmeenergie umgesetzt werden (Abbildung 34). (Reiser et al. 2011)

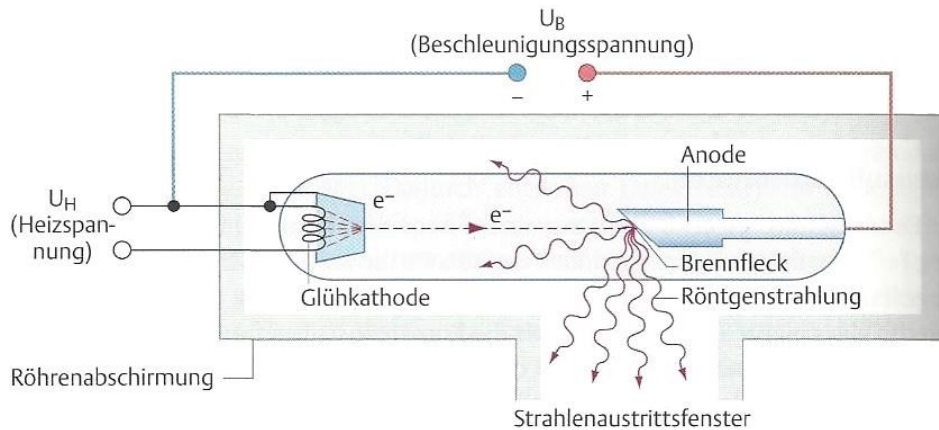


Abbildung 34: Schematische Darstellung einer Röntgenröhre (modifiziert aus Reiser et al. 2011)

Die entstandene Strahlung durchtritt Materie, wobei durch Absorption und Streuung eine Schwächung stattfindet. Diese ist abhängig von der Dichte, Dicke und Ordnungszahl des durchdrungenen Materials. Je dicker, dichter und höher die Ordnungszahl, desto heller stellt sich das Objekt dar. So erscheint Luft am dunkelsten. Fett, Wasser, Weichgewebe und Knochen stellen sich zunehmend heller dar. (Reiser et al. 2011)

4.7.2 Geräte

Für die Projektionsradiographie standen folgende Röntgengeräte (Flachdetektoren) zur Verfügung:

- Digitaldiagnost (1) TH + VT Optimus 70 Philips GmbH Baujahr 2001
- Digitaldiagnost (2) TH + VT Optimus 80 Philips GmbH Baujahr 2002
- Digitaldiagnost (3) Optimus 50 Philips GmbH Baujahr 2005

4.7.3 Untersuchungsablauf

Es können folgende Aufnahmen angefertigt werden:

- dorsopalmar (d.p.)
- Seitbild
- Funktionsaufnahmen: Radial- und Ulnarduktion oder alternativ Faustschluss-Aufnahme

4.7.4 Auswertung

Die Röntgenbilder wurden in Bezug auf eine SL-Dissoziation und den scapholunären Winkel ausgewertet. Dieser Winkel wird bestimmt, indem in der seitlichen Röntgenaufnahme „die Senkrechte auf die Verbindungslinie von Vorder- und Hinterhorn des Os lunatum gezeichnet und als zweiter Schenkel des SL-Winkels die Tangente palmar an den distalen und den proximalen Pol des Skaphoids gelegt wird“ (Bickert und Kneser 2015). Abbildung 35 a) stellt dies exemplarisch für eine vorhandene DISI-Fehlstellung dar, b) zeigt eine scapholunäre Dissoziation in den Funktionsaufnahmen.

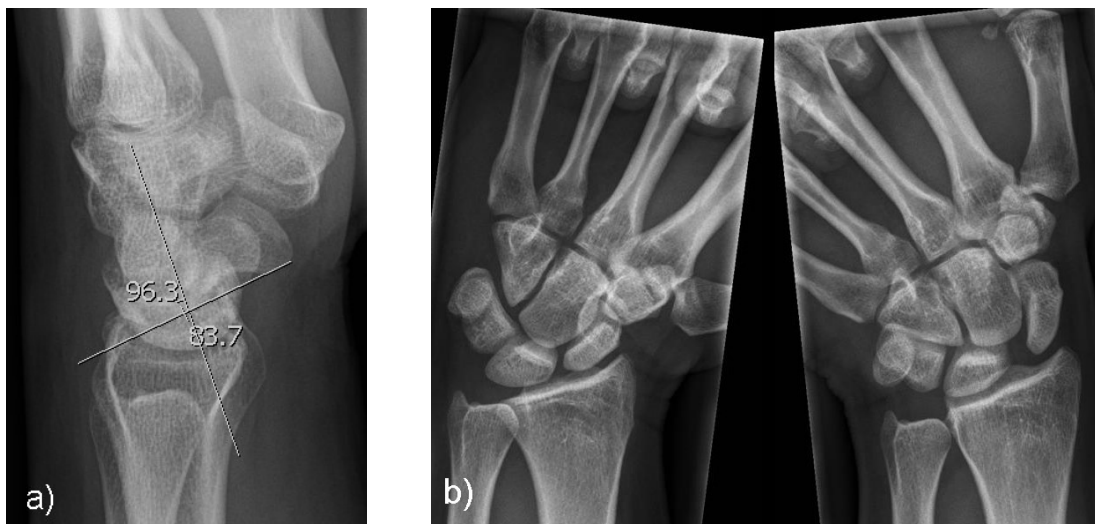


Abbildung 35: a) Röntgenbild der linken Hand im Seitbild, Bestimmung des SL-Winkels – DISI-Fehlstellung b) SL-Dissoziation in d.p. Röntgenfunktionsaufnahmen bei SL-Bandruptur

4.8. Statistische Auswertung

4.8.1 Gruppeneinteilung

Für die Auswertung der gewonnenen Daten wurden alle Patienten beziehungsweise Daten zusammengeführt und entsprechend zur Beantwortung der dargestellten Hypothesen neu gruppiert (Tabelle 8).

Gruppe	Beschreibung
Gruppe A „Intakt“	Schließt alle Patienten mit intaktem SL-Band ein, welches durch entsprechende Diagnostik bestätigt wurde. Weiterhin werden alle Sonographien der Gegenseite inkludiert, da kein Trauma vorliegt und somit ein intaktes Band vorausgesetzt wird. Ein Individuum kann folglich zweimal vorkommen.
Gruppe B „Läsion“	Enthält alle Patienten mit Verletzung (Komplett- und Teiltrupuren)
Gruppe C „Kompletttraktur“	Schließt alle Patienten mit Kompletttraktur ein.
Gruppe D „Teiltraktur“	Schließt alle Patienten mit Teiltraktur palmar und dorsal ein.
Gruppe E „Gesamt“	Schließt alle Patienten ein. Jedes Individuum wird nur einmal betrachtet.

Tabelle 8: Übergeordnete Gruppeneinteilung

4.8.2 Verwendete Statistik

Zur Berechnung der Statistik diente das Programm „IBM SPSS Statistics“ Version 25. Ein P-Wert $< 0,05$ wurde als statistisch signifikant angesehen. Messungen mit verschiedenen Methoden an einem Individuum stellen verbundene Stichproben dar. Beispielhaft sei hier der Vergleich von Sonographie und MRT mit Messungen an einer Hand genannt. Der Seitenvergleich von rechter und linker Hand eines Patienten zählt dazu.

Darstellbarkeit

Zur Auswertung der Darstellung des SL-Bandes waren die Diagnostika MRT, Sonographie, Arthroskopie und die Operation einbezogen. Für jedes Verfahren wurde die Darstellbarkeit des Bandes als kategoriale, nominal skalierte Variable mit dichotomer Ausprägung – „darstellbar“ und „nicht darstellbar“ – erstellt.

Hypothese 1

Dies wurde mittels graphischer Darstellung durch Säulendiagramme und Häufigkeitsverteilung betrachtet, wobei Patienten der Gruppe A (alle Intakten) und Gruppe B (alle mit Verletzung) eingeschlossen waren.

Hypothese 2

Die Prüfung auf Übereinstimmung der Sonographie mit den anderen Methoden erfolgte mittels Cohens-Kappa als Interrater-Reliabilität (Urteilerübereinstimmung) an allen Patienten (Gruppe E). Die Interrater Reliabilität gibt das Ausmaß der Übereinstimmung von zwei Beobachtern an einem Objekt, in diesem Fall der Messmethoden an der Hand, an (Wirtz und Caspar 2002). Liegen kategoriale Variablen vor, so wird Cohens-Kappa verwendet (Kwiecien et al. 2011). Tabelle 9 zeigt die Kategorisierung der Werte.

Wert von K	Ausmaß der Übereinstimmung
< 0,20	nicht ausreichend (poor)
0,21–0,40	hinreichend (fair)
0,41–0,60	moderat (moderat)
0,61–0,80	gut (good)
0,81–1,0	sehr gut (very good)

Tabelle 9: Kategorisierung von Cohens-Kappa Werten (nach Altman 1999, Kwiecien et al. 2011)

Weiterhin wurden Kreuztabellen verwendet. Diese geben die absoluten Häufigkeiten bestimmter Variablen und deren Ausprägung an. Auf Unterschiede testet der McNemar-Test, welcher verbundene Stichproben mit dichotomer Merkmalsausprägung vergleicht.

Hypothese 3

Verglichen wurde die Darstellbarkeit in der Sonographie von rechter und linker Hand entsprechend der Diagnose (intakt/nicht intakt). Als statistische Mittel kamen Kreuztabellen und der McNemar-Test zur Anwendung. Zum Test auf Übereinstimmung diente Cohens-Kappa.

Abstand

Bei der Abstandsmessung kamen die Diagnostika MRT und Sonographie zur Anwendung. Die verbundenen Variablen waren metrisch (intervall) skaliert. Dabei erfolgte die Verwendung der Daten aller Patienten (Gruppe E).

Hypothese 4

Es wurde auf Übereinstimmung der beiden Methoden geprüft. Als Maß für die Interrater-Reliabilität kam für intervallskalierte Variablen der Intra-Class-Korrelationskoeffizient (Typ ICC 3,1) mit absoluter Übereinstimmung (unjustiert) zur Anwendung. Werte unter 0,5 zeigen eine schlechte (poor) Reliabilität, Werte zwischen 0,5 und 0,75 eine moderate, Werte zwischen 0,75 und 0,9 eine gute (good) und Werte über 0,9 eine hervorragende (excellent) Reliabilität (Übereinstimmung) an (Koo und Li 2016).

Mittels Bland-Altman-Diagrammen wurde die Differenz der Messwerte (SL-Abstand) von MRT und Sonographie gegen den Mittelwert aufgetragen. Jeder aufgetragene Wert stellt entsprechend ein Individuum dar. Je näher der Punkt an der Nulllinie liegt, desto mehr stimmen die Verfahren überein. 95 % der (erwarteten) Werte liegen hierbei im Übereinstimmungsbereich („limits of agreement“), welcher durch den Mittelwert der Differenzen \pm das 1,96-fache der Standardabweichung definiert ist (Bland und Altman 1999).

Hypothese 5

Beim sonographischen Vergleich der Abstände der betroffenen mit der Gegenseite fanden die Daten der Gruppe E mit Unterteilung in intaktes und verletztes SL-Band Anwendung. Zur Deskription wurden Boxplots verwendet und auf Unterschiede mittels Wilcoxon-Test getestet. Voraussetzung für einen T-Test ist die Normalverteilung der Daten. Die Messwerte wurden hierauf mittels Shapiro-Wilk-Test geprüft (Tabelle 10). Für die Messpunkte „dorsal“ und „Mitte“ bei Läsion ergab sich diese nicht. Die Voraussetzung einer Gruppengröße von mindestens 30 (Siebert und Siebert 2018) lag nicht vor, sodass der T-Test als parametrischer Test nicht zur Anwendung kommen konnte. Deshalb wurde der Wilcoxon-Test als nicht parametrischer Test verwendet. Ein P-Wert $< 0,05$ galt als statistisch signifikant. Weiterhin erfolgte die Prüfung auf Übereinstimmung im Fall von intakten SL-Bändern an beiden Händen mittels ICC und graphische Darstellung durch ein Bland-Altman-Diagramm.

		Shapiro-Wilk		
		Statistik	df	Signifikanz
Intakt	Differenz dorsal	0,962	9	0,824
	Differenz Mitte	0,952	9	0,708
	Differenz palmar	0,958	9	0,774
Läsion	Differenz dorsal	0,901	20	0,043
	Differenz Mitte	0,828	20	0,002
	Differenz palmar	0,942	20	0,261

Tabelle 10 Test der Differenz der Messwerte der Sonographie auf Normalverteilung

Hypothese 6

Es fand ein Vergleich von Patienten mit Komplett- und Teilruptur statt. Die Darstellung erfolgte mittels Streudiagramm. Aufgrund der hier vorliegenden begrenzten Fallzahl wurde auf die Durchführung von Tests verzichtet und eine alleinige deskriptive Beschreibung gewählt.

Abstand Funktionsaufnahmen

Die Hypothesen 7 und 8 wurden aufgrund der begrenzten Fallzahl deskriptiv mittels Linien- und Balkendiagrammen betrachtet. Für Hypothese 8 erfolgte die Überprüfung, ob die Differenz von Ulnarduktion und Radialduktion der betroffenen Seite größer als die der gesunden Gegenseite ist.

Cut-off-Wert für Läsion

Hypothese 9

Einziges Diagnostikum war die Sonographie mit Betrachtung der SL-Abstände aller unverletzten Hände (Gruppe A) und mit Läsion (Gruppe B). Der Schwellenwert wurde mit Hilfe von ROC-Kurven (Receiver Operating Characteristic) bestimmt. Dabei wird die Richtig-Positiv-Rate (= Sensitivität) gegen die Falsch-Positiv-Rate (= 1 - Spezifität) abgetragen (Kumar und Indrayan 2011). Aus den Koordinaten der Kurve lässt sich für einen Messwert entsprechend die Sensitivität und Spezifität ablesen. Die Fläche unter der Kurve (AUC = Area under the Curve bzw. Area under the ROC-Curve) gibt die Güte des Tests an. Je größer der Wert, desto höher die Güte (Weiß 2013).

Zur Berechnung des Cut-off-Werts wurde der Youden-Index benutzt. Dieser berechnet sich aus Sensitivität + Spezifität – 1 und ist umso besser, je höher

der Wert. (Moosbrugger und Kelava 2012, Perkins und Schisterman 2005, 2006)

Score

Es konnte ein Score entwickelt werden, der eine Beurteilung des SL-Bandes im klinischen Alltag ermöglichen soll. Zur Bildung und Auswahl der Kriterien gingen die Ergebnisse der vorangegangenen Hypothesen ein. Den Variablen beziehungsweise bestimmten Kombinationen wurden Punktwerte zugeordnet. Grundüberlegung ist, dass ein höherer Punktwert für das Vorliegen einer Verletzung kodiert. Tabelle 11 zeigt die mögliche Punkteverteilung. Für die Darstellbarkeit erfolgt die Betrachtung jeweils für dorsal und palmar. Es kann eine Maximalpunktzahl von 12 erreicht werden.

Variable		Punkte
Abstand betroffene Seite dorsal \geq Cut-off-Wert		1 (0, wenn kleiner)
Abstand betroffene Seite Mitte \geq Cut-off-Wert		1 (0, wenn kleiner)
Abstand betroffene Seite palmar \geq Cut-off-Wert		1 (0, wenn kleiner)
Differenz dorsal \geq Cut-off-Wert		1 (0, wenn kleiner)
Differenz Mitte \geq Cut-off-Wert		1 (0, wenn kleiner)
Differenz palmar \geq Cut-off-Wert		1 (0, wenn kleiner)
Darstellbarkeit betroffene Seite	Darstellbarkeit Gegenseite	jeweils palmar und dorsal
darstellbar	darstellbar	0
darstellbar	nicht darstellbar	1
nicht darstellbar	nicht darstellbar	2
nicht darstellbar	darstellbar	3
Maximalpunktzahl		12

Tabelle 11: Punkteverteilung für den Score zur Beurteilung des SL-Bandes

Mittels ROC-Kurve und Youden-Index wurde ein Cut-off-Wert für den Score bestimmt, ab dem mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit eine Verletzung des scapholunären Bandes vorliegt.

5. Ergebnisse

5.1. Darstellbarkeit

5.1.1 Hypothese 1 – bildmorphologisches Korrelat des SL-Bandes in der Sonographie

Abbildung 36 zeigt die beispielhafte Darstellung eines intakten scapholunären Bandes dorsal bei mehreren Patienten. Analog stellt dies Abbildung 37 für palmar dar. Zu erkennen ist die durchgängige echoreiche fibrilläre Struktur zwischen Scaphoid und Lunatum.

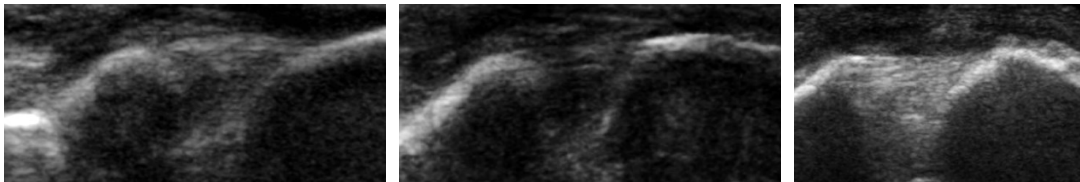


Abbildung 36: beispielhafte Darstellungen eines intakten SL-Bands dorsal im Ultraschall bei mehreren Patienten

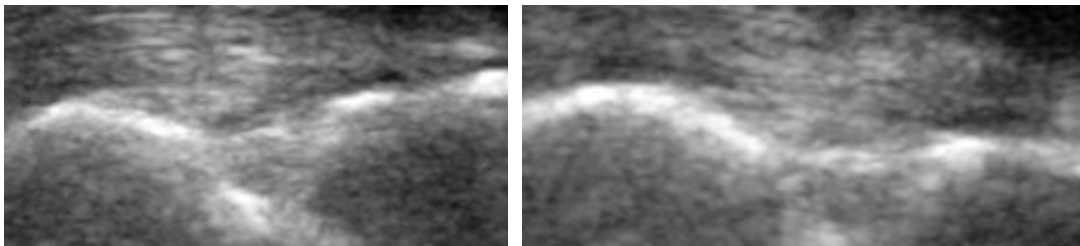


Abbildung 37: beispielhafte Darstellungen eines intakten SL-Bands palmar im Ultraschall bei zwei Patienten

Abbildung 38 zeigt die Verteilung der sonographischen Darstellbarkeit des intakten SL-Bandes entsprechend Gruppe A. Eingeschlossen sind hier die Funktionsbewegungen Radial- (RD) und Ulnarduktion (UD). In nur fünf (dorsal) und acht (palmar) Fällen war das Band trotz Intaktheit nicht darstellbar. Dorsal fand sich folglich eine Sichtbarkeit in Neutralstellung von 89,6 % und palmar von 83,3 %.

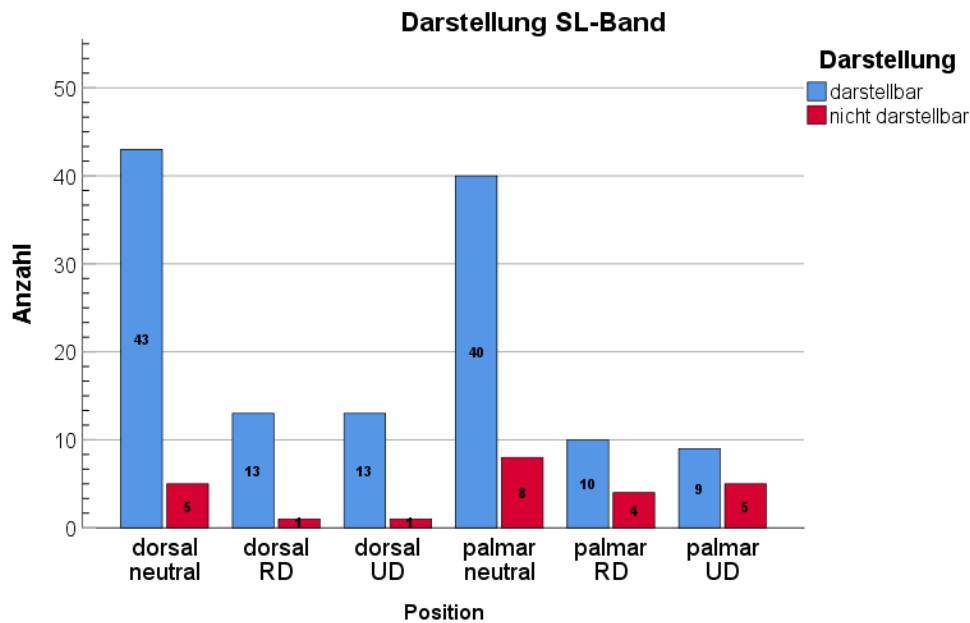


Abbildung 38: Darstellung SL-Band bei „Intakten“ in der Sonographie

Lag eine scapholunäre Läsion vor, unabhängig ob Komplett- oder Teilruptur (Gruppe B), war das SL-Band richtigerweise dorsal zu 75% und palmar zu 80 % nicht darstellbar (Abbildung 39). Betrachtet man nur die Komplett rupturen (Abbildung 40) fand sich dieses dorsal nur in einem Fall fälschlicherweise darstellbar.

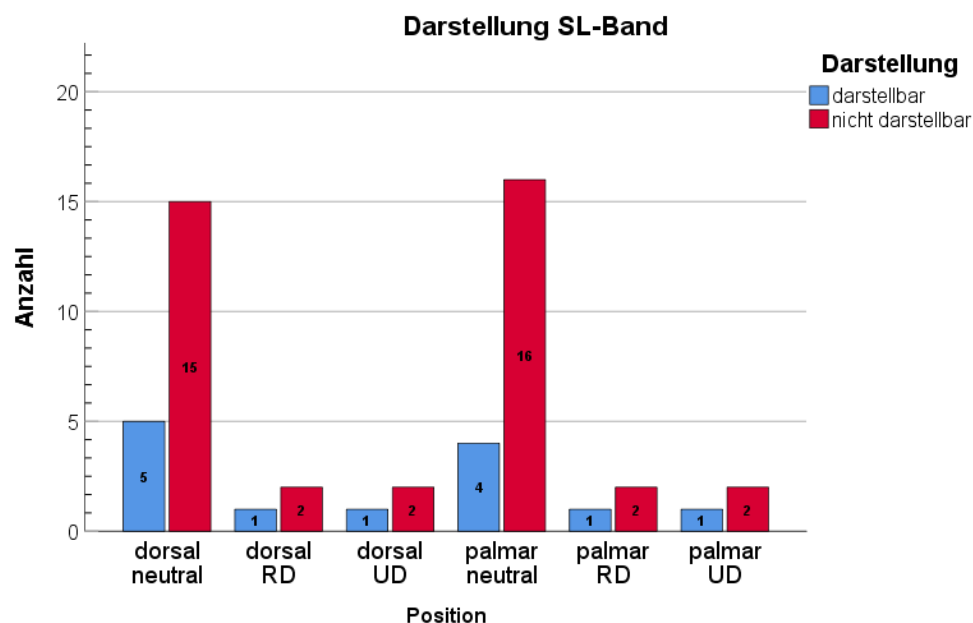


Abbildung 39: Darstellung SL-Band bei "Läsion" in der Sonographie

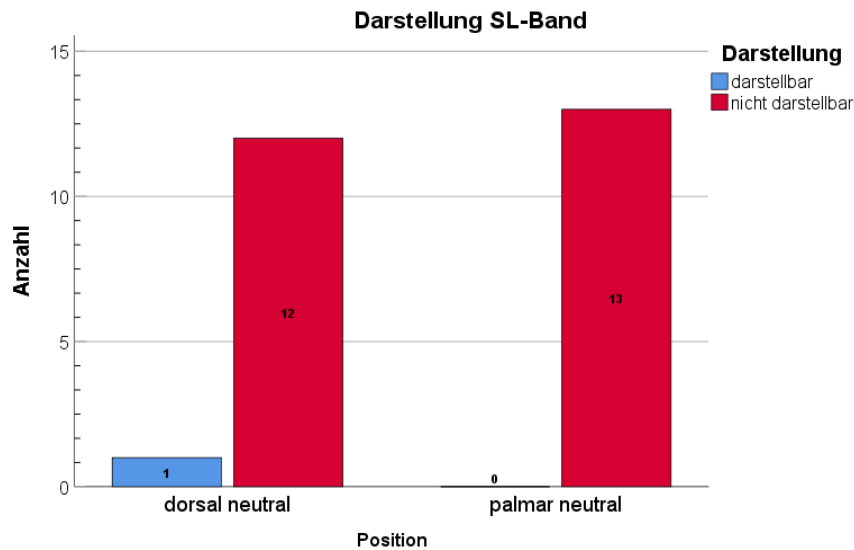


Abbildung 40: Darstellung SL-Band bei "Komplettruptur" in der Sonographie

Durch den Einsatz von Tissue harmonic imaging konnte keine bessere Darstellung eines intakten SL-Bandes erreicht werden.

5.1.2 Hypothese 2 – Methodenvergleich

Bezüglich der sonographischen Darstellbarkeit des scapholunären Bandes ergab sich die Frage, ob diese mit den anderen Methoden übereinstimmt. Idealerweise sollten die Diagnostika zum selben Ergebnis führen. Eingeschlossen in die folgende Betrachtung sind alle Patienten entsprechend Gruppe E. Tabelle 12 zeigt die Kreuztabelle von Sonographie und MRT am dorsalen Messpunkt. Zu 82,6 % gelang mittels Sonographie eine SL-Banddarstellung bei nachweisbarem Band in der MRT. Ein nicht vorhandenes beziehungsweise defektes Band war im Ultraschall fälschlicherweise zu 25 % als darstellbar gewertet worden. Zum Vergleich der Unterschiede ergibt sich im McNemar-Test eine exakte Signifikanz (zweiseitig) von 0,125. Somit besteht kein signifikanter Unterschied zwischen den Methoden am dorsalen Messpunkt. Cohens-Kappa gibt einen Wert von 0,765 und somit eine gute Übereinstimmung an.

		MRT dorsal		Gesamt
		nicht darstellbar	darstellbar	
Sonographie dorsal neutral	nicht darstellbar	12	0	12
	darstellbar	4	19	23
Gesamt		16	19	35

Tabelle 12: Kreuztabelle Darstellbarkeit SL-Band in Sonographie und MRT dorsal

Analog stellt Tabelle 13 dies für den palmaren Messpunkt dar. Ein in der MRT sichtbares Band war sonographisch zu rund 79 % erkennbar und bei magnetresonanztomographisch fehlender Darstellbarkeit im Ultraschall zu 75 % nicht sichtbar. Hier ergibt sich eine exakte Signifikanz (zweiseitig) von 1,0. Entsprechend besteht kein signifikanter Unterschied zwischen den Methoden. Cohens-Kappa beträgt 0,539 und gibt somit eine moderate Übereinstimmung an.

		MRT palmar		Gesamt
		nicht darstellbar	darstellbar	
Sonographie palmar neutral	nicht darstellbar	12	4	16
	darstellbar	4	15	19
Gesamt		16	19	35

Tabelle 13: Kreuztabelle Darstellbarkeit SL-Band in Sonographie und MRT dorsal

Betrachtet man Sonographie und Arthroskopie ließ sich das SL-Band dorsal und auch palmar zu 100 % (n = 7) nicht darstellen, wobei arthroskopisch eine Läsion beziehungsweise Komplettruptur vorlag. Vergleicht man die Operation mit der Sonographie am dorsalen Messpunkt, fand sich in 7 von 7 Fällen ein sonographisch nicht darstellbares scapholunäres Band bei operativ gesicherter Ruptur. In einem Fall war ein intaktes Band im Ultraschall durchgängig darstellbar. Es ergibt sich dadurch im McNemar-Test eine exakte Signifikanz (zweiseitig) von 1,0 und somit kein signifikanter Unterschied zwischen Operation und Ultraschall. Cohens-Kappa zeigt mit 1,0 eine sehr gute (vollständige) Übereinstimmung der Methoden an. Palmarseitig ließ sich das SL-Band nie sonographisch darstellen, wobei in sechs Fällen operativ eine Ruptur gesichert wurde und in zwei Fällen ein intaktes Band vorlag.

5.1.3 Hypothese 3 – Seitenvergleich Darstellbarkeit in der Sonographie

Wichtig zur Differenzierung von Pathologien ist der Seitenvergleich von gesunder und betroffener Seite. Im Rahmen der Hypothese wurde postuliert, dass sich das Band bei Verletzung auf der betroffenen Seite nicht und auf der gesunden Seite durchgängig hyperechogen darstellen lässt. Bei intaktem Ligament sollte sich entsprechend auf beiden Seiten eine regelhafte Darstellung finden. Tabelle 14 zeigt die entsprechende Verteilung für den Messpunkt dorsal. Lag eine Verletzung vor, ließ sich das SL-Band im Vergleich zur gesunden Gegenseite signifikant häufiger nicht darstellen (McNemar $p = 0,006$). Bei intaktem Band gelang in 10 Fällen die durchgängige Darstellung auf der klinisch betroffenen Seite und auf der Gegenseite einmalig nicht. Eine Berechnung von Cohens-Kappa ist aufgrund der einseitigen Ausprägung der Darstellbarkeit der betroffenen Seite als „darstellbar“ nicht möglich. Es zeigt sich jedoch eine sehr gute Übereinstimmung von rechter und linker Hand.

Diagnose			Gegenseite dorsal neutral		Gesamt
			nicht darstellbar	darstellbar	
Läsion	betroffene Seite dorsal neutral	nicht darstellbar	4	11	15
		darstellbar	1	4	5
	Gesamt		5	15	20
intakt	betroffene Seite dorsal neutral	darstellbar	1	9	10
	Gesamt		1	9	10

Tabelle 14: Kreuztabelle Darstellbarkeit SL-Band in Sonographie betroffene Seite und Gegenseite dorsal bei „intaktem“ SL-Band und „Läsion“

Analog zu Tabelle 14 zeigt Tabelle 15 die Verteilung für den palmaren Messpunkt. Im Falle einer Läsion beträgt die exakte Signifikanz (zweiseitig) im McNemar $< 0,01$ und stellt damit einen signifikanten Unterschied in der Darstellbarkeit zwischen betroffener und gesunder Seite dar. Bei intaktem Band findet sich dieser nicht ($p = 1,0$). Jedoch beträgt hier Cohens-Kappa nur 0,048 und zeigt damit eine nicht ausreichende Übereinstimmung der sonographischen Darstellbarkeit des scapholunären Bandes von rechter und linker Hand an.

Diagnose			Gegenseite palmar neutral		Gesamt
			nicht darstellbar	darstellbar	
Läsion	betroffene Seite palmar neutral	nicht darstellbar	3	13	16
		darstellbar	0	4	4
	Gesamt		3	17	20
intakt	betroffene Seite palmar neutral	nicht darstellbar	1	2	3
		darstellbar	2	5	7
	Gesamt		3	7	10

Tabelle 15: Kreuztabelle Darstellbarkeit SL-Band in Sonographie betroffene Seite und Gegenseite palmar bei „intaktem“ SL-Band und „Läsion“

5.2. Abstand

Tabelle 16 zeigt die Mittelwerte, Median sowie Minimal- und Maximalwerte für die gemessenen Abstände von MRT, Sonographie und die Differenz beider Hände jeweils bei intaktem Band sowie bei Läsion an. Dabei finden sich sowohl bei der Magnetresonanztomographie als auch beim Ultraschall Überschneidungen der Messwertbereiche des scapholunären Abstands bei rupturiertem und intaktem Band. Ein Intervall, welches lediglich für eine Läsion diskriminiert existiert nicht. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Werte bei Verletzung größer als bei unverletztem Ligament sind. Dies findet sich für jeden Messpunkt. In der Betrachtung stellt sich der Median unempfindlicher gegenüber Ausreißern dar. Beispielsweise beträgt der Median dorsal bei Läsion in der Sonographie 5,8 mm, der Mittelwert wird durch den Maximalwert von 9,4 mm beeinflusst und beträgt 6,4 mm.

Verfahren	Zustand	Anzahl	Messpunkt											
			dorsal				Mitte				palmar			
			\bar{x}	\tilde{x}	Min.	Max.	\bar{x}	\tilde{x}	Min.	Max.	\bar{x}	\tilde{x}	Min.	Max.
MRT	intakt	17	4,8	5,0	3,2	6,5	1,9	1,7	1,3	3,2	4,8	4,6	3,6	5,9
	Läsion	17	5,5	5,2	4,0	7,9	3,3	3,3	1,6	5,4	5,9	5,6	3,4	8,1
Sonographie	intakt	48	5,0	5,0	3,2	6,7	2,0	1,7	0,9	4,0	5,1	5,2	3,1	7,8
	Läsion	20	6,4	5,8	5,0	9,4	3,0	2,5	2,0	6,2	6,3	6,3	4,0	9,3
Differenz betroffene und Gegenseite	intakt	9	0,4	0,6	-1,0	2,1	0,2	0,2	-0,5	1,1	0,2	0,1	-1,5	1,8
	Läsion	20	1,2	0,8	-0,2	3,4	0,9	0,6	-0,8	4,2	1,1	1,0	-1,3	4,1

Werte in mm, \bar{x} = Mittelwert, \tilde{x} = Median, Min. = Minimalwert, Max. = Maximalwert

Tabelle 16: SL-Abstände in MRT und Sonographie sowie Differenz beider Hände jeweils bei „Läsion“ und „intaktem“ SL-Band

5.2.1 Hypothese 4 – Methodenvergleich MRT und Sonographie

Die gemessenen Abstände von Sonographie und MRT wurden auf Übereinstimmung untersucht. Idealerweise sollten laut Hypothese 4 die Werte am jeweiligen Messpunkt identisch sein. Entsprechend zeigt Tabelle 17 den Intra-Class-Korrelationskoeffizienten für die Interrater-Reliabilität zwischen beiden Verfahren an. Der ICC gibt für alle Messpunkte eine gute Reliabilität (Intervall 0,75-0,9) an. Betrachtet man das Konfidenzintervall lässt sich an der Untergrenze lediglich eine moderate Übereinstimmung (Intervall 0,5-0,75) der Methoden feststellen. Jedoch bietet die Obergrenze (Messpunkte „dorsal“ und „Mitte“) exzellente Werte (Intervall 0,9-1) von über 0,9 (vgl. 4.8.2 Abstand Seite 53). Der Ultraschall zeigt folglich insgesamt eine gute Übereinstimmung mit der MRT und liefert ähnliche, jedoch nicht identische Abstandswerte.

Messpunkt	ICC	95 %-Konfidenzintervall	
		Untergrenze	Obergrenze
dorsal	0,812	0,612	0,908
Mitte	0,807	0,584	0,907
palmar	0,78	0,565	0,889

Tabelle 17: Intra-Class-Korrelationskoeffizient für Interrater-Reliabilität von Sonographie und MRT

Zum weiteren Methodenvergleich und zur visuellen Veranschaulichung zeigt Abbildung 41 den Bland-Altman-Plot für den dorsalen Messpunkt. Der Mittelwert der Differenzen liegt bei -0,38 mm. Entsprechend misst die Sonographie den SL-Abstand im Schnitt um diesen Wert mehr als die MRT. Die Mehrzahl der Differenzen liegt im Bereich ± 1 mm und somit zum großen Teil nah und gleichmäßig verteilt um den Nullpunkt im Sinne einer Homoskedastizität.

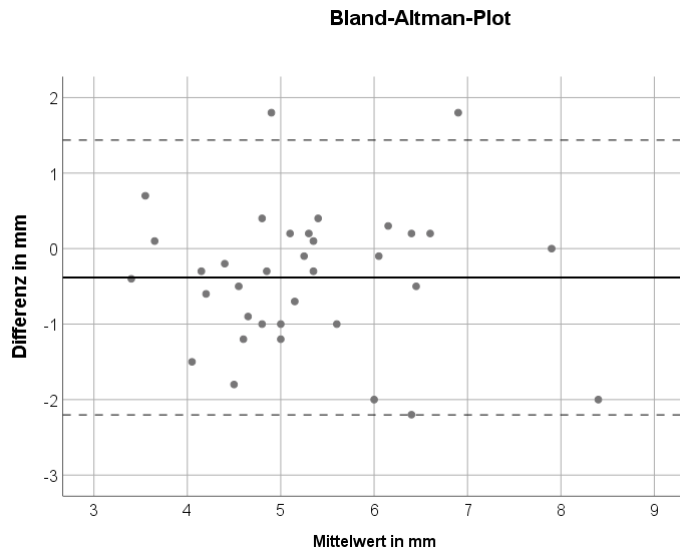


Abbildung 41: Bland-Altman-Plot von MRT und Sonographie dorsal

Am mittleren Messpunkt liegt der Differenzmittelwert bei 0,37 mm. In Abbildung 42 wird ersichtlich, dass der Großteil der dargestellten Werte über dem Nullpunkt liegt und zwei Ausreißer vorhanden sind.

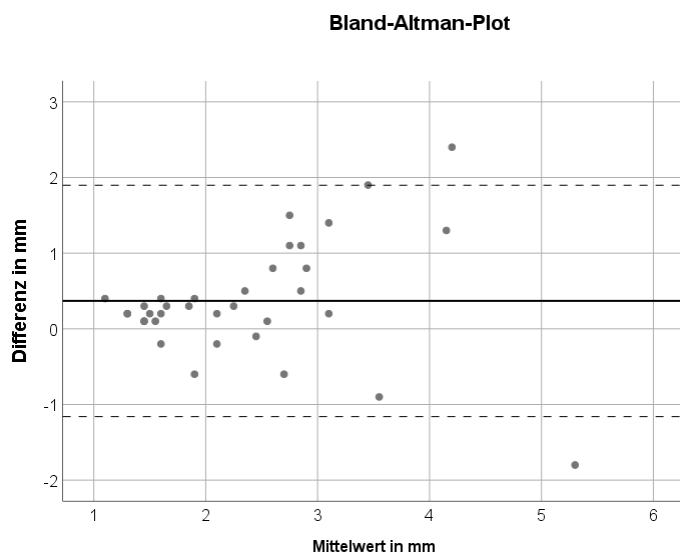


Abbildung 42: Bland-Altman-Plot von MRT und Sonographie Mitte

Palmar findet sich eine mittlere Differenz von -0,12 mm mit ausgeglichener Verteilung um den Nullwert sowie je einem Ausreißer über und unter dem 1,96-fachen der Standardabweichung (Abbildung 43).

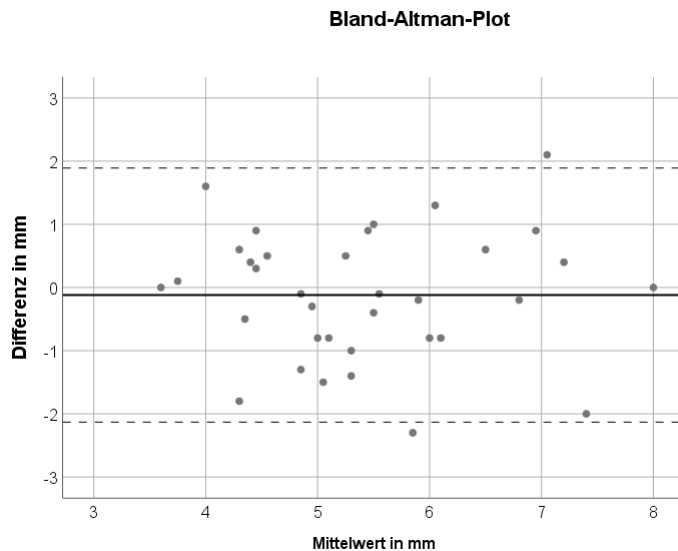


Abbildung 43: Bland-Altman-Plot von MRT und Sonographie palmar

Insgesamt zeigt sich somit eine gute Übereinstimmung der sonographischen scapholunären Abstandsmessung mit der magnetresonanztomographischen. Mittlere Differenzen nahe dem Nullpunkt sowie eine Verteilung der Werte im Bereich ± 1 mm verdeutlichen dies.

5.2.2 Hypothese 5 – Seitenvergleich Abstand in der Sonographie

Im Folgenden werden die im Ultraschall gemessenen Abstände der betroffenen Seite und der Gegenseite bei beidseitig intaktem SL-Band und bei einseitiger Läsion verglichen. Hier sollten entsprechend der Hypothese die Abstände der (gesunden) Gegenseite bei Verletzung geringer und bei intaktem SL-Band gleich sind. Abbildung 44 stellt den Boxplot für ein unverletztes Band dar. Die Abstände zeigen für die rechte und linke Hand einen ähnlichen Bereich an mit guter Übereinstimmung der oberen und unteren Quartile für den dorsalen und palmaren Messpunkt. Führt man einen Wilcoxon-Test durch, findet man keine signifikanten Unterschiede zwischen den Messwerten. Die Interrater-Reliabilität ist für den Messpunkt „Mitte“ mit 0,925 am größten. Hier zeigt das Konfidenzintervall weiterhin die höchste Untergrenze im Vergleich zu den anderen. Somit liegt in diesem Fall die größte Übereinstimmung des scapholunären Abstands zwischen rechter und linker Hand bei intaktem Band vor. (Tabelle 18)

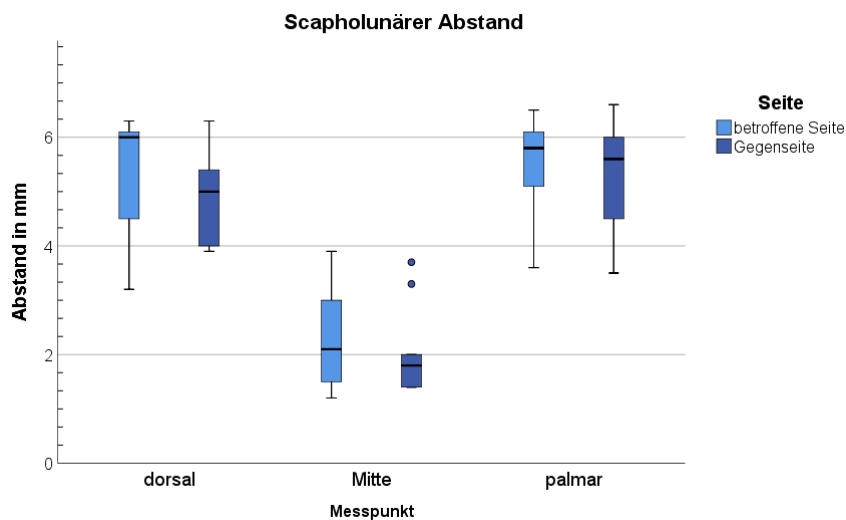


Abbildung 44: Scapholunärer Abstand in der Sonographie der betroffenen Seite und Gegenseite bei intaktem SL-Band

Paarung (N = 9)	Wilcoxon-Test – p-Wert	ICC [Konfidenzintervall]
betroffene Seite neutral dorsal - Gegenseite neutral dorsal	0,286	0,695 [0,184; 0,929]
betroffene Seite neutral Mitte - Gegenseite neutral Mitte	0,325	0,925 [0,693; 0,983]
betroffene Seite neutral palmar - Gegenseite neutral palmar	0,284	0,666 [0,489; 0,925]

Tabelle 18: Test auf Unterschied und Übereinstimmung für SL-Abstand in der Sonographie der betroffenen Seite und Gegenseite bei intaktem SL-Band

Zur weiteren Differenzierung zwischen Läsion und intaktem SL-Band im Seitenvergleich der Hände ist die Kenntnis der mittleren Differenzen der Abstände wichtig. Im Bland-Altman-Plot (Messpunkte dorsal, Mitte, palmar) der Sonographie von rechter und linker Hand ergibt sich bei intaktem SL-Band ein Mittelwert von 0,274 mm und eine nahe, gleichmäßige Verteilung um den Nullwert (Abbildung 45). Entsprechend liegen in der Regel maximal Differenzen von ± 1 mm zwischen nicht verletzten Händen vor.

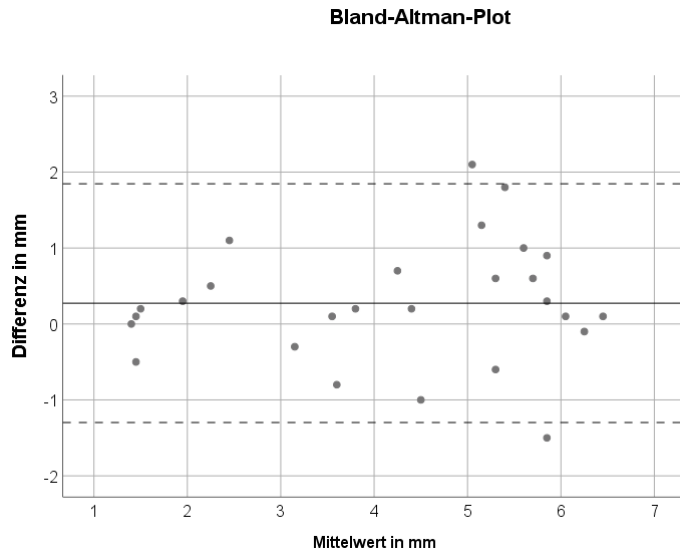


Abbildung 45: Bland-Altman-Plot der Abstände (dorsal, Mitte, palmar) der Sonographie von rechter und linker Hand bei intaktem SL-Band

Liegt hingegen eine Ruptur des scapholunären Bandes vor, zeigt sich die in Abbildung 46 dargestellte Messwertverteilung. Die Abstände bzw. deren Verteilung auf der gesunden Gegenseite lagen bei allen Messpunkten unter denen der lädierten Seite. Die Abstände waren somit bei Verletzung im Vergleich zur Gegenseite vergrößert (Mittelwert/Median dorsal 1,2/0,8 mm; Mitte 0,9/0,6 mm; palmar 1,1/1 mm). Diese Mittelwertunterschiede sind für alle Messpunktpaarungen signifikant (Tabelle 19).

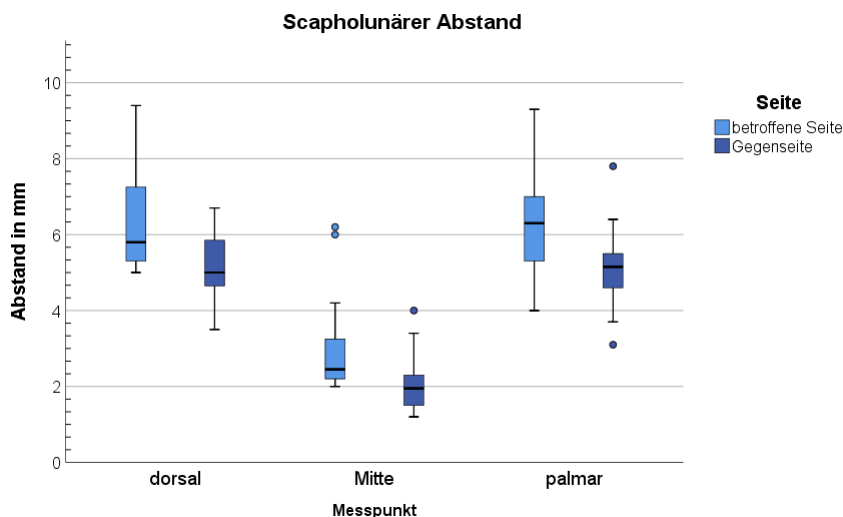


Abbildung 46: Scapholunärer Abstand in der Sonographie der betroffenen Seite und Gegenseite bei defektem SL-Band

Paarung (N = 20)	T-Test	Wilcoxon-Test – p - Wert
betroffene Seite neutral dorsal - Gegenseite neutral dorsal	<0,01	<0,01
betroffene Seite neutral Mitte - Gegenseite neutral Mitte	<0,01	<0,01
betroffene Seite neutral palmar - Gegenseite neutral palmar	<0,01	<0,01

Tabelle 19: T-Test/Wilcoxon-Test für SL-Abstand in der Sonographie der betroffenen Seite und Gegenseite bei defektem SL-Band

Der Bland-Altman-Plot der Abstände (dorsal, Mitte, palmar) in der Sonographie von betroffener und Gegenseite bei defektem SL-Band bestätigt eine mittlere Differenz von 1,183 mm (Abbildung 47). Bis auf sechs Werte unter und drei auf dem Nullwert liegen alle anderen darüber. Somit liegt in der Regel bei Verletzung ein größerer scapholunärer Abstand im Vergleich zur gesunden Gegenseite vor. Ausnahmen mit Differenzgleichheit sowie negativer Differenz sind möglich.

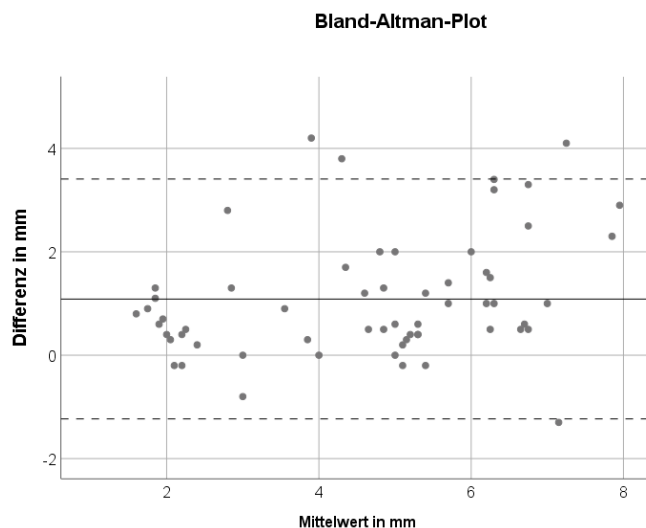


Abbildung 47: Bland-Altman-Plot der Abstände (dorsal, Mitte, palmar) in der Sonographie von betroffener und Gegenseite bei defektem SL-Band

5.2.3 Hypothese 6 – Abstände bei Komplett- und Teilruptur

Die Abstände sollten bei Komplett- und Teilruptur keine Unterschiede aufweisen. Abbildung 48 zeigt ein gruppiertes Streudiagramm. Man kann feststellen, dass die Messwerte bei Teilruptur im unteren Bereich des Intervalls für eine vollständige Läsion liegen. Der Minimalwert wird nur palmar einmalig unterschritten. Somit stellt die Partialruptur eine Teilmenge der Komplett-ruptur dar.

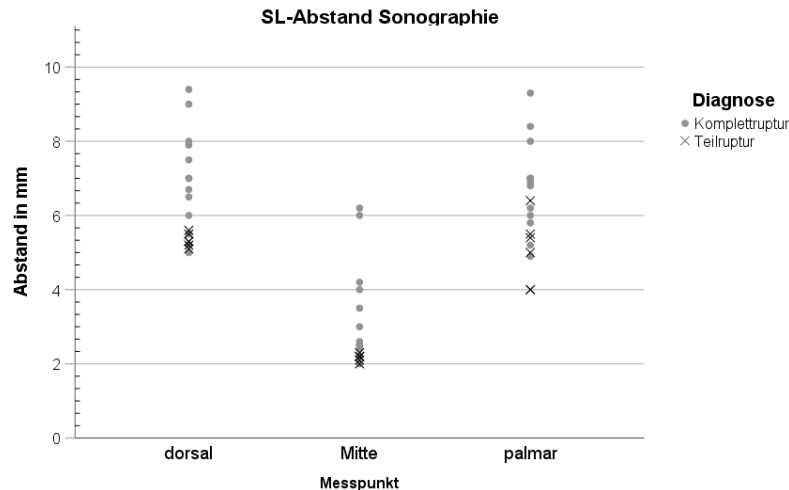


Abbildung 48: SL-Abstand in der Sonographie bei Komplet- und Teilruptur

5.3. Abstand Funktionsaufnahmen

5.3.1 Hypothese 7 – Physiologisches Abstandsverhalten

Die Stressaufnahmen wurden in der initialen Gruppe 3 eingeführt. Aufgrund von (postoperativer) Schwellung, Schmerzen oder begleitend vorliegender Fraktur konnten diese jedoch nicht regelhaft durchgeführt werden. Insgesamt waren 9 Patienten mit Untersuchung von rechter und linker Hand eingeschlossen (4 Patienten mit verletztem und 5 mit intaktem SL-Band). In einem Fall konnten wegen einer Radiusfraktur keine Funktionsaufnahmen durchgeführt werden. Daraus resultiert eine Fallzahl von 17. Die Abstände bei Ulnarduktion (UD) sollten größer und bei Radialduktion (RD) kleiner als in Neutralstellung sein. Der Mittelwert der Messpunkte (dorsal, Mitte, palmar) wurde für alle Fälle (betroffene Seite und Gegenseite) für die Funktionsaufnahmen aufgetragen (Abbildung 49). In der Tendenz lässt sich ein physiologisches Abstandsverhalten nachvollziehen. Vier Fälle zeigen eine paradoxe SL-Spaltverkleinerung bei Ulnarduktion. Abbildung 50 zeigt die Mittelwerte der entsprechenden Messpunkte. Es bestätigt sich die Hypothese, dass bei Ulnarduktion ein größerer und bei Radialduktion ein geringer Abstand im Vergleich zur Neutralstellung vorlagen.

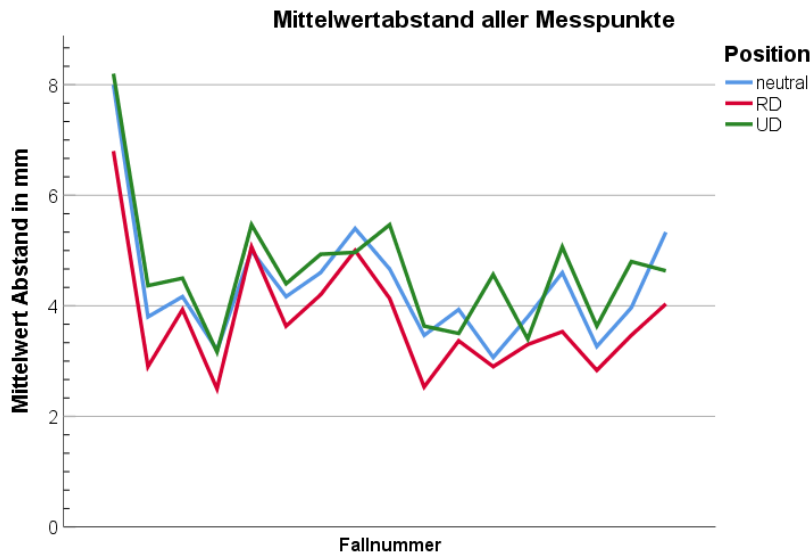


Abbildung 49: Mittelwertabstand aller Messpunkte (dorsal, Mitte, palmar) je Patient für die Funktionsaufnahmen in der Sonographie

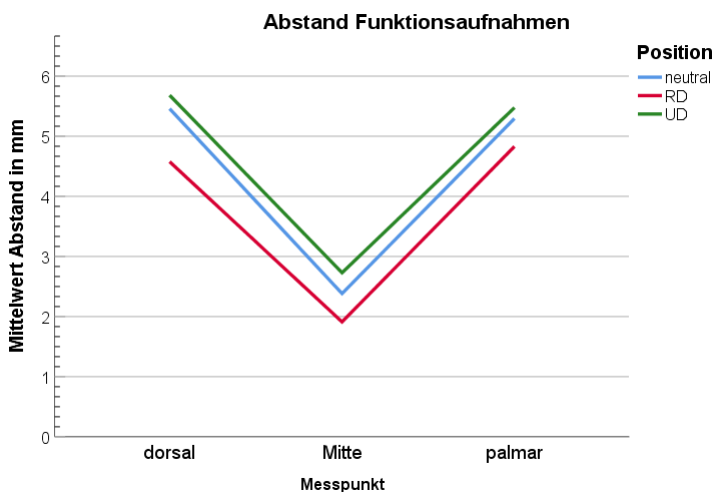


Abbildung 50: Mittelwertabstand der einzelnen Messpunkte für die Funktionsaufnahmen in der Sonographie aller Patienten

5.3.2 Hypothese 8 – Scapholunäre Dissoziation

Durch die scapholunäre Dissoziation (Auseinanderweichen von Kahn und Mondbein) bei Verletzung sollte eine größere Differenz zwischen den Messwerten von Ulnarduktion und Radialduktion im Vergleich zur Gegenseite vorliegen und bei intaktem Band keine. Dies lässt sich palmar zu 100 % und dorsal sowie Mitte in zwei von drei Fällen bei Läsion bestätigen (Abbildung 51). Für ein unverletztes Ligament findet sich ein solches Verhalten palmar und im mittleren Messpunkt nicht (Abbildung 52).

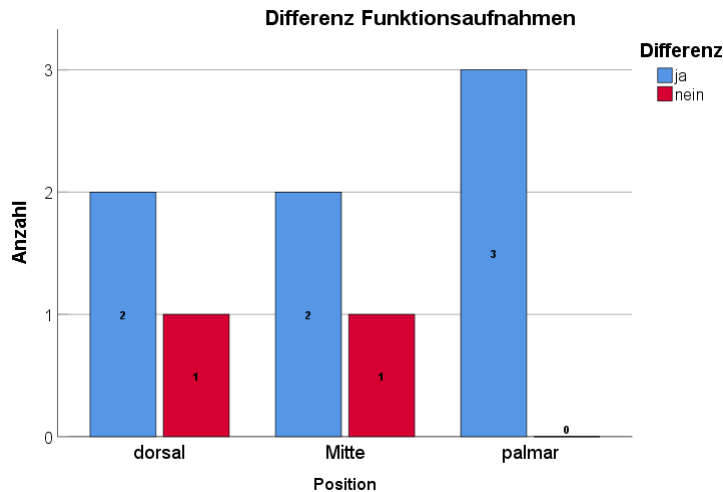


Abbildung 51: Unterschied der Differenzen der Funktionsaufnahmen von betroffener Seite und Gegenseite für Diagnose „Läsion“

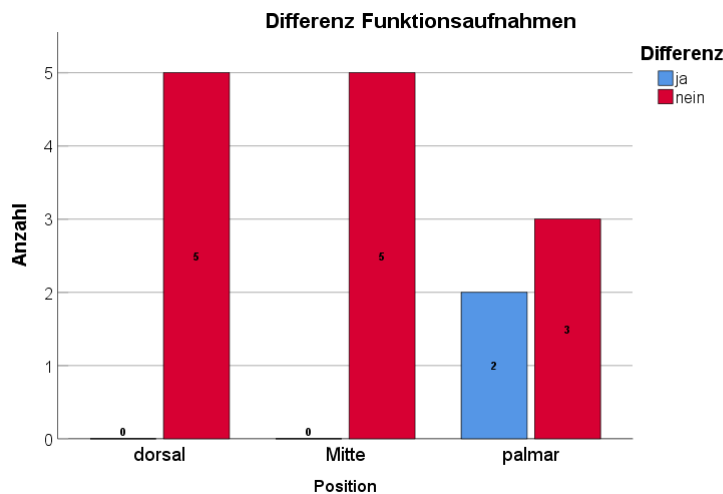


Abbildung 52: Unterschied der Differenzen der Funktionsaufnahmen von betroffener Seite und Gegenseite für Diagnose „intakt“

5.4.Cut-off-Wert für Läsion

5.4.1 Hypothese 9

Ziel der Arbeit war es unter anderem einen Cut-off-Wert für die Abstände zu bestimmen, ab dem eine Verletzung vorliegt. Es lagen insgesamt 68 Fälle vor. Davon hatten 20 ein verletztes SL-Band. In 48 Fällen war dieses intakt. Es wurde eine ROC-Kurve für die nativen Messwerte erstellt (Abbildung 53). Die Area under the curve (AUC) (Tabelle 20) gibt für den dorsalen und mittleren Messpunkt einen guten Test-Wert von 0,82 an (vgl. Kategorisierung ICC – Seite 53).

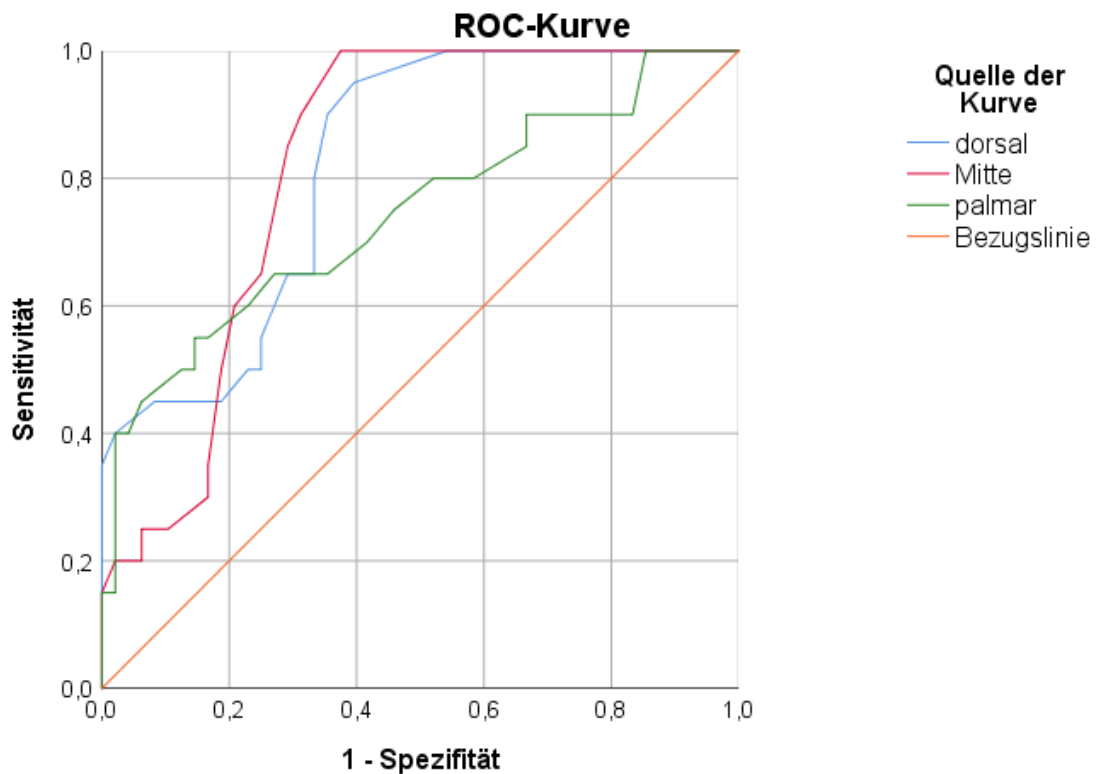


Abbildung 53: ROC-Kurve für die nativen SL-Abstände in der Sonographie

Fläche unter der Kurve (AUC)					
Variable(n) für Testergebni s	Fläche	Standard- Fehler ^a	Asymptotisch e Signifikanz ^b	Asymptotisches 95% Konfidenzintervall	
				Untergrenz e	Obergrenz e
dorsal	0,82	0,051	0	0,72	0,921
Mitte	0,82	0,049	0	0,723	0,917
palmar	0,743	0,071	0,002	0,605	0,882
a. Unter der nichtparametrischen Annahme					
b. Nullhypothese: Wahrheitsfläche = 0.5					

Tabelle 20: AUC für die ROC-Kurve (Abbildung 53)

Entsprechend der Hypothese ist der Seitenvergleich von betroffener Seite und Gegenseite wichtig. Es wurden die Differenzen der Messwerte (betroffene Seite – Gegenseite) gebildet und eine ROC-Kurve erstellt (Tabelle 21, Abbildung 54)

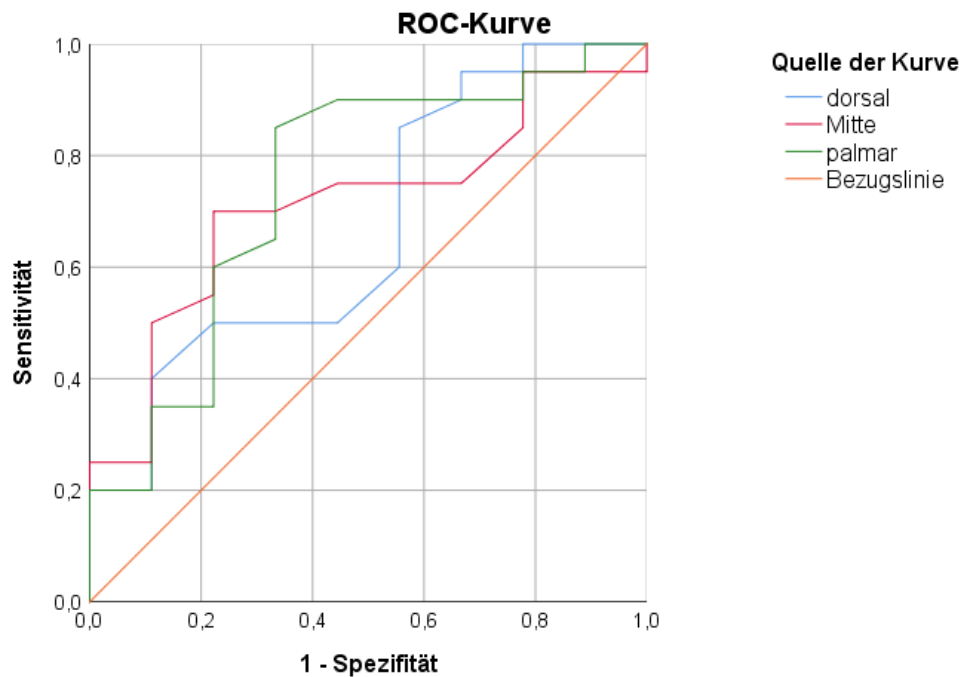


Abbildung 54: ROC-Kurve für die Differenz der SL-Abstände von betroffener Seite und Gegenseite in der Sonographie

Fläche unter der Kurve (AUC)					
Variable(n) für Testergebnis	Fläche	Standard- Fehler ^a	Asymptotisch e Signifikanz ^b	Asymptotisches 95% Konfidenzintervall	
				Untergrenze	Obergrenze
dorsal	0,669	0,111	0,15	0,452	0,887
Mitte	0,711	0,1	0,073	0,516	0,906
palmar	0,744	0,106	0,038	0,537	0,952
a. Unter der nichtparametrischen Annahme					
b. Nullhypothese: Wahrheitsfläche = 0.5					

Tabelle 21: AUC für die ROC-Kurve (Abbildung 54)

Mit Hilfe des Youden-Index wurden die Cut-off-Werte für das Vorliegen einer SL-Band-Verletzung bestimmt (siehe Tabellenverzeichnis Seite V – „Koordinaten der ROC-Kurve“). Tabelle 22 zeigt diese für den nativen SL-Abstand sowie die Differenz von betroffener und Gegenseite mit zugehöriger Sensitivität und Spezifität. Ab 5,05 mm dorsal und 1,95 mm im mittleren Messpunkt wird mit sehr hoher Sensitivität (0,95 und 1) eine Läsion erkannt. Zur Unterscheidung, ob diese tatsächlich vorliegt, bietet der native palmare Abstand (6,15 mm) sowie die dorsale Differenz (1,15 mm) die

höchste Spezifität (0,85 und 0,89). Die angegebenen Werte stellen folglich die empfohlenen Cut-off-Werte dar.

	Messpunkt	Abstand in mm	Sensitivität	Spezifität	Youden- Index
SL- Abstand	dorsal	5,05	0,95	0,604	0,554
	Mitte	1,95	1	0,625	0,625
	palmar	6,15	0,55	0,854	0,404
Differenz Betroffene & Gegenseite	dorsal	1,15	0,4	0,889	0,289
	Mitte	0,3	0,7	0,778	0,478
	palmar	0,35	0,85	0,667	0,517

Tabelle 22: Cut-off-Werte mit entsprechender Sensitivität und Spezifität

5.5. Sonographischer SL-Band-Score

Abbildung 55 zeigt die ROC-Kurve für den sonographischen SL-Band-Score (vgl. Score Seite 56). Es ergibt sich eine AUC von 0,93 und damit eine sehr gute Teststärke. Tabelle 23 zeigt die Koordinaten der Kurve mit errechneter Spezifität und Youden-Index an. Hieraus lässt sich ein Cut-off-Wert von 6 Punkten ableiten. Dieser Wert bietet das beste Erkennungsverhältnis von Läsion und richtig-positiv Rate. Entsprechend liegt ab 6 Punkten mit 0,85 Sensitivität und 0,9 Spezifität eine SL-Band Verletzung vor.

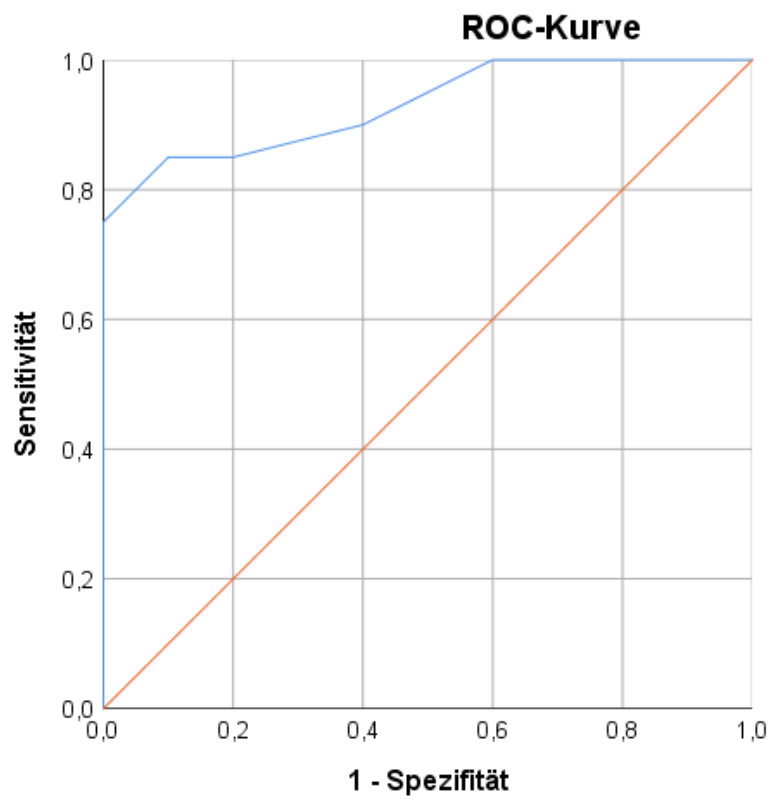


Abbildung 55: ROC-Kurve für den Score

Positiv (für Läsion), wenn größer oder gleich	Sensitivität	1 - Spezifität	Spezifität	Youden-Index
-1	1	1	0	0
0,5	1	0,9	0,1	0,1
1,5	1	0,8	0,2	0,2
2,5	1	0,6	0,4	0,4
3,5	0,9	0,4	0,6	0,5
4,5	0,85	0,2	0,8	0,65
6	0,85	0,1	0,9	0,75
7,5	0,75	0,	1	0,75
8,5	0,65	0	1	0,65
9,5	0,6	0	1	0,6
10,5	0,25	0	1	0,25
11,5	0,1	0	1	0,1
13	0	0	1	0

Tabelle 23: Koordinaten der ROC-Kurve (Abbildung 55) und Youden-Index

6. Diskussion

6.1. Allgemeine Aspekte

Die abschließende Diagnose einer SL-Bandruptur bei den Patienten und Unterteilung in Teil- und Komplettrupturen für die hier vorliegenden Daten wurde in Zusammenschau der Befunde unter Einbezug aller vorhandenen Diagnostika gestellt. Dadurch bestehen sehr hohe Spezifitätswerte und falsch-positive Einteilungen sind unwahrscheinlich. Beispielsweise wurde bei einem Patienten mit Komplettruptur des scapholunären Bandes diese mittels MRT und Arthroskopie gesichert. Verzerrungen der Ergebnisse durch Übertragung der sonographischen Befunde auf falsche Diagnosen sind somit nahezu ausgeschlossen.

Laut Schmitt et al. ist die Ultraschaldiagnostik methodenbedingt nur auf das dorsale Ligament begrenzt (Schmitt et al. 2006). Dieser Feststellung kann man in Hinblick auf die hier dargestellten Ergebnisse widersprechen. Der palmare Anteil ist einer Betrachtung und Beurteilung zugänglich.

Die Wahl der sonographischen Messpunkte mit Definition der Abstände erfolgte aufgrund der empirisch festgestellten Lage des SL-Bandes im Ultraschall. Bei Gesunden Patienten und Probanden war in der Sonographie ein intaktes Band ab ca. 0,5 mm dorsal und ca. 1 mm palmar unterhalb der Tangente zu sehen (siehe auch 4.4.5 Messmethode Seite 43). Der mittlere Messpunkt respektiert die bei MRT und Röntgen übliche Messung in der Mitte zwischen den Handwurzelknochen. Methodenbedingt nimmt mit zunehmender Eindringtiefe, insbesondere bei hohen Schallfrequenzen, die Auflösung ab und der SL-Spalt wird unschärfer. 3,5 mm Abstand zur Tangente bieten einen Kompromiss um den aufgeführten Aspekten gerecht zu werden und eine adäquate Messung zu ermöglichen.

6.2. Ergebnisbezogene Zusammenfassung und Beurteilung

6.2.1 Untersuchungsablauf

Der Untersuchungsablauf mit Orientierung an anatomischen Landmarken, wie von mehreren Autoren beschrieben, wurde beibehalten (Kendi und Güdemez 2006, Boutry et al. 2005, Jacobson et al. 2002, Taljanovic et al. 2011, Taljanovic et al. 2008). Als dynamische Untersuchung bietet die Sonographie einige Vorteile. Insbesondere Bewegungen können direkt nachverfolgt werden. Dies wird im Folgenden deutlich. Das dorsale radiotriquetrale Band kann bei SL-Bandruptur in die Lücke zwischen Scaphoid und Lunatum schlagen und einen falsch-negativen Befund hervorrufen. Eine dynamische Untersuchung im Sinne von Ulnar- und Radialduktion erscheint sinnvoll, um diesen Effekt zu minimieren. (Renoux et al. 2009) Eine beschriebene Fehlerquelle stellen Anisotropie-Artefakte dar. Durch Bewegen des Schallkopfes und somit das Einstellen einer anderen Ebene können diesen vermieden werden (Renoux et al. 2009).

6.2.2 Darstellbarkeit

Mittels Röntgen können keine ligamentären Strukturen dargestellt werden (Reiser et al. 2011). Die Arthroskopie und Operation erlauben zwar eine direkte Darstellung, Untersuchung und somit eine Beurteilung des SL-Bandes, sind aber in Bezug auf eine reine bildmorphologische Vergleichbarkeit zum Ultraschall nur bedingt geeignet. Adäquater ist die Magnetresonanztomographie, da, ähnlich zur Sonographie, in mehreren Ebenen Schnittbilder erzeugt werden.

Die von mehreren Autoren beschriebene sonographische Darstellung eines intakten scapholunären Bandes als hyperechogene, fibrilläre, parallele Struktur zwischen den Handwurzelknochen (Kendi und Güdemez 2006, Davis und Blankenbaker 2010, Griffith et al. 2001, Ramamurthy et al. 2016, Taljanovic et al. 2011, Taljanovic et al. 2008, Finlay et al. 2004) konnte bestätigt werden. Ein Vergleich der sonographischen Darstellbarkeit mit anderen Methoden wurde von Taljanovic et al. durchgeführt. Es zeigte sich

eine rund 94%ige Übereinstimmung des Ultraschalls mit den Methoden Magnetresonananzarthrographie und Arthroskopie. (Taljanovic et al. 2008). Eine ähnliche Betrachtung mit Vergleich der Sonographie zu den unterschiedlichen Diagnostika erfolgte im Rahmen dieser Arbeit.

In den Ergebnissen konnte gezeigt werden, dass für alle Verfahren das bildmorphologische Korrelat eines intakten oder rupturierten SL-Bandes in der Sonographie dargestellt werden konnte. Die Übereinstimmung von MRT und Sonographie ist gut, jedoch dorsal besser als palmar (vgl. 5.1.2 Hypothese 2 – Methodenvergleich Seite 59). Ursächlich könnten hier die Unterschiede zwischen der dorsalen (89,6%) und palmar (83,3 %) Darstellbarkeit eines intakten Bandes sein. Eventuell scheint ein Aufsuchen volarseitig anatomisch bedingt schwieriger, weil entsprechende Landmarken wie das Tuberculum listeri fehlen. Eine Unterteilung der Sichtbarkeit des Bandes, wie von anderen Autoren vorgenommen, wurde nicht durchgeführt. Hintergrund ist die Überlegung, dass ein intaktes Band in jedem Fall durchgängig darstellbar sein sollte. Für teilweise sichtbare Bänder muss eine entsprechende Schnittebene gefunden werden, bis eine durchgängige Darstellung gelingt. Zeigen sich jedoch deutliche Diskontinuitäten erfolgt zur Vereinfachung, auch im Hinblick auf eine klinische Anwendung, die Wertung als nicht darstellbar. Dies kodiert entsprechend für eine Läsion. Boutry et al. untersuchten mittels Ultraschall an 30 Händen die Darstellbarkeit der extrinsischen und intrinsischen carpalen Bänder und fanden für das scapholunäre Band dorsal eine vollständige Sichtbarkeit von 97 %, teilweise sichtbar 3 % und palmar eine erschwerte Erkennbarkeit mit vollständig sichtbar von 81 % und teilweise sichtbar von 12 % (Boutry et al. 2005). Im Vergleich zu den in dieser Arbeit vorliegenden Werten zeigen sich dorsal bessere (+7,4 %) und palmar schlechtere (-2,3 %) Darstellbarkeiten. Griffith et al. untersuchten 200 gesunde Hände und fanden dorsal ein vollständig (100 %) sichtbares Band in 47,5 % (95) der Fälle, teilweise sichtbar ($\geq 50\%$) in 30 % (60), kaum sichtbar ($< 50\%$) in 7,5 % (15) und nicht sichtbar in 15 % (30) der Fälle. Palmar wurde ein vollständig sichtbares Band in 7 % (13) der Fälle, teilweise sichtbar in 9 % (17), kaum

sichtbar in 8 % (15) und nicht sichtbar in 76 % (151) der Fälle beschrieben. (Griffith et al. 2001) Die schlechteren Darstellbarkeiten, insbesondere palmar, konnten in dieser Arbeit nicht nachvollzogen werden. Kendi und Güdemez untersuchten den dorsalen Anteil des SL-Bandes mittels konventioneller Sonographie und tissue harmonic imaging (THI) an beiden Händen von 20 gesunden und 3 Personen mit SL-Bandverletzung. Es erfolgte eine Unterscheidung der Sichtbarkeit als komplett (100 %), teilweise (> 50 %), kaum (< 50 %) und nicht sichtbar (0 %). Die vollständige Sichtbarkeit konnte mittels THI von 77 % (33 von 43) auf 91 % (39 von 43) gesteigert werden. (Kendi und Güdemez 2006) THI findet Anwendung im Bereich der Abdomensonographie und Echokardiographie (Widder und Görtler 2015). Laut anderen Autoren ist der THI für oberflächliche Strukturen nicht geeignet (Ohno et al. 2015, Lutz 2007, Widder und Görtler 2015). Weiterhin erleichtert tissue harmonic imaging nicht die Diagnose einer SL-Band-Ruptur (Kendi und Güdemez 2006). Im Rahmen der Arbeit konnte keine verbesserte Darstellung des scapholunären Bandes oder genauere Identifikation eines rupturierten Bandes durch THI festgestellt werden. Eine prinzipielle Empfehlung zur regelhaften bzw. obligatorischen Anwendung ist somit nicht gegeben. Die additive Verwendung ist jedoch möglich. Da anderen Autoren eine verbesserte Darstellung intakter Bänder gelang überwiegt dies den fehlenden Nutzen bei rupturierten Bändern.

Bei SL-Bandruptur zeigt sich ein echoarmer Raum zwischen Scaphoid und Lunatum oder es stellt sich eine Diskontinuität mit eventuell vorhandenen Bandresten/-stümpfen dar. Diese Beobachtungen werden durch mehrere Studien bestätigt (Davis und Blankenbaker 2010, Jacobson et al. 2002, Taljanovic et al. 2008, Taljanovic et al. 2011). Insbesondere das Fehlen einer fibrillären echoreichen Struktur beweist jedoch nicht eine Ruptur. Wie gezeigt werden konnte, liegt die Sichtbarkeit eines intakten Bandes nicht bei 100 %. Auch in anderen Untersuchungen wurde dieser Umstand beschrieben und als Kritikpunkt angesehen (Griffith et al. 2001, Boutry et al. 2005, Kendi und Güdemez 2006). Weiterhin wurden defekte Bänder fälschlicherweise als intakt

beziehungsweise mit kontinuierlicher, fibrillärer, echoreicher Struktur gewertet (siehe Abbildung 39 Seite 58). Eine Erklärung hierfür könnten bei subakuten Verletzungen ein organisiertes Hämatom oder im Falle alter Läsionen Narbengewebe sein, welches ein intaktes Band vortäuscht. Als alleiniges Beurteilungskriterium ist die Darstellbarkeit des SL-Bandes folglich nicht geeignet.

Ein wichtiger Aspekt in der Diagnostik ist der Seitenvergleich. Beispielsweise wird in der Röntgendiagnostik, wie bereits beschrieben, ein Mitröntgen der Gegenseite empfohlen, um Pathologien aufzudecken (Towfigh et al. 2011, Vogt 2011, Megerle und Machens 2015). Somit kommt dem Seitenvergleich in der Sonographie eine besondere Bedeutung zu. Insbesondere, da der Ultraschall ein unschädliches Verfahren ist. Es konnte gezeigt werden, dass jeweils palmar und dorsal, bei intaktem SL-Band eine beidseitige Darstellung gelang. Jedoch finden sich palmar starke Limitationen der Übereinstimmung (Cohens-Kappa = 0,048). Dieser Aspekt lässt sich durch die schlechtere palmare Erkennbarkeit, wie sie auch andere Autoren (Griffith et al. 2001, Boutry et al. 2005) beschreiben, erklären. Bei einer Läsion fanden sich signifikante Unterschiede zwischen der betroffenen Seite im Vergleich zur Gegenseite. Hierbei gelang dorsal in 73 % und palmar in 76 % der Fälle keine Darstellung bei gegenseitig regelhafter, kontinuierlicher Sichtbarkeit. Die Betrachtung der Gegenseite liefert somit, insofern keine bekannten Pathologien oder relevanten Traumata vorliegen, eine Beurteilungsgrundlage. Nur einseitig (auf der gesunden Seite) darstellbare SL-Bänder sind hochsuspekt für eine Läsion der betroffenen Seite.

6.2.3 Abstand

Ein direkter Vergleich der SL-Abstände von MRT und Sonographie findet sich in der Literatur nicht und stellt unter anderem das Novum dieser Arbeit dar. Bei Untersuchung beider Methoden konnte festgestellt werden, dass, im Sinne der Betrachtung der Interrater-Reliabilität, eine gute Übereinstimmung besteht. Wird das Konfidenzintervall betrachtet, zeigt sich für alle Messpunkte ein Bereich von moderater bis hervorragender Genauigkeit.

Dies bestätigen die Bland-Altman-Plots (siehe Abbildung 41, Abbildung 42, Abbildung 43 Seiten 64 und 65). Die mittlere Differenz liegt für alle Messpunkte nahe beziehungsweise nahezu beim Nullwert. Im Mittel unterscheiden sich die Methoden um maximal ± 1 bis 2 mm. Ein normaler Abstand in der Magnetresonanztomographie würde jedoch eventuell bei Zunahme um 2 mm pathologisch werden. MRT und Sonographie sind somit keine äquivalenten Untersuchungen in Bezug auf die Messung des SL-Abstands. Eine einfache Übertragung der in der Sonographie gemessenen Werte auf die in der Magnetresonanztomographie geltenden Grenzwerte für den scapholunären Abstand ist folglich nicht möglich. Jedoch können die in dieser Arbeit für den Ultraschall angepassten und definierten Werte eine Beurteilung erlauben.

Zudem wurde untersucht, ob eine Teilruptur, im Vergleich zur vollständigen SL-Bandruptur (palmar und dorsal), einen Einfluss auf den gemessenen Abstand hat. Die Teilrupturwerte lagen im unteren Bereich des Intervalls für komplett rupturierte Bänder. Sie stellen somit eine Teilmenge dar. Im Hinblick auf die Rolle der Sonographie als Screeningmethode könnte zur Vereinfachung folglich eine gemeinsame Betrachtung von Komplett- und Teilverletzung erfolgen.

Wie auch in Bezug zur Darstellbarkeit ermöglicht der Seitenvergleich eine Aussage zu eventuell vorhandenen Pathologien. Bei unverletztem SL-Band ließen sich keine signifikanten Abstandsunterschiede zwischen den Händen feststellen. Die Interrater-Reliabilität ist für den mittleren Messpunkt mit 0,925 am höchsten und gibt im Konfidenzintervall [0,693; 0,983] eine moderate bis hervorragende Übereinstimmung an. Die dorsalen und palmaren Messpunkte zeigen eine moderate Übereinstimmung, jedoch mit sehr großem Bereich des Konfidenzintervalls von schlechter bis hervorragender Übereinstimmung. Die Beurteilung des Abstandes im Ultraschall scheint somit, wie auch bei anderen diagnostischen Methoden (Prommersberger et al. 2014, Ramamurthy et al. 2016), ein geeignetes Kriterium zur Detektion einer SL-Dissoziation zu sein. Dabei ist der mittlere Messpunkt aufgrund der zuvor beschriebenen höchsten Urteilerübereinstimmung (Interrater-Reliabilität) zu favorisieren. In dieser

Arbeit wurde für ein intaktes Band ein dorsaler Abstand von 5 mm (Bereich 3,2 – 6,7 mm) und bei Läsion von 6,4 mm (Bereich 5,0 – 9,4 mm) gefunden. Linke und rechte Hand unterschieden sich bei intaktem Band im Mittel um 0,4 mm, maximal um 2,1 mm und im Mittel bei Verletzung um 1,2 mm. Eine direkte Vergleichbarkeit mit den im Folgenden aufgeführten Werten aus anderen Studien ist nicht möglich, da dort eine genaue Definition des Messpunkts, insbesondere bei Vorliegen einer Ruptur bzw. bei nicht sichtbarem Band, fehlt. Griffith et al. fanden einen mittleren dorsalen SL-Abstand in Neutralposition von 4,2 mm (Bereich 2,3 – 6,3 mm). Linke und rechte Hand unterschieden sich nicht mehr als 2,5 mm. Als Limitierung für die Messung beschrieben sie das Fehlen von identifizierbaren anatomischen Marken. (Griffith et al. 2001) Kendi und Güdemez untersuchten den sapholunären Abstand und nahmen hingegen einen Messpunkt zwischen dem dorsalen Aspekt von Scaphoid und Lunatum, wo das SL-Band am meisten sichtbar erschien. Es wird ein Abstand von 3,3 mm (Bereich 2,9 – 4,5 mm) für ein intaktes Band und 6,1 mm (Bereich 5,6 – 6,8 mm) für ein rupturiertes beschrieben. Die betroffene Seite zeigte einen Abstand $\geq 2,5$ mm im Vergleich zur unverletzten Gegenseite. (Kendi und Güdemez 2006) Vergleicht man die Messwerte der genannten Studien unter Respektierung, dass mutmaßlich ein verschiedener Messpunkt vorliegt, zeigen sich leichte Unterschiede. Insbesondere durch einige Ausreißer, der im Rahmen dieser Arbeit gemessenen Werte, besteht ein großer Bereich mit hohen Maximalwerten. Die Wertebereiche zwischen den Studien und den hier vorliegenden Daten überschneiden sich. Diese Überschneidung findet sich auch für den Fall von intaktem und lädiertem Band. Es existiert somit, im Vergleich zu den anderen Studien, ein Bereich, in dem keine explizite Zuordnung zu intakt oder defekt möglich ist. Ein Vergleich des palmaren sowie mittleren Abstands mit anderen Studien ist nicht möglich, da hierzu keine Literaturangaben existieren.

Die zugrunde liegenden Daten zeigen, dass sich wie erwartet verletzte und unverletzte Hand hinsichtlich des Abstands mehr unterscheiden, als bei beidseitig intaktem Band. Dies ist unabhängig vom Messpunkt. Folglich sollte

der Seitenvergleich des Abstands ein weiteres Kriterium zur Beurteilung des SL-Bandes und einer scapholunären Dissoziation darstellen.

6.2.4 Abstand Funktionsaufnahmen

Die karpale Kinematik mit Vergrößerung des SL-Abstands bei Ulnarduktion und Verkleinerung bei Radialduktion konnte in den durchgeführten Messungen bestätigt werden. Eine scapholunäre Dissoziation ließ sich beim Vergleich von betroffener und Gegenseite bei Verletzung am dorsalen und mittleren Messpunkt nachvollziehen. Aufgrund der begrenzten Fallzahl ist eine genaue Aussage jedoch nicht möglich, da in einem von drei Fällen trotz defektem SL-Band keine Dissoziation vorlag und bei intaktem Band in zwei von 5 Fällen palmar eine Dissoziation gemessen wurde. Griffith et al. fanden unvorhersehbare Änderungen des Abstands bei Ulnar- und Radialduktion (Griffith et al. 2001). Diese Beobachtung konnte von Renoux et al. bestätigt werden (Renoux et al. 2009). Die Betrachtung des Abstands bei Funktionsaufnahmen scheint somit nicht empfehlenswert. Dieser kann lediglich eine Orientierung bieten oder bei deutlichen Dissoziationen einen Nutzen entfalten. Entscheidender sind die Funktionsaufnahmen, wie bereits beschrieben, um verschiedene Spannungszustände des Bandes zu untersuchen und ein Einschlagen von extrinsischen Bändern in den SL-Spalt bei Bandruptur zu verhindern (Renoux et al. 2009).

6.2.5 Cut-off-Wert

Für diverse Untersuchungen, Verfahren, Laborwerte und Scores existieren Cut-off-Werte, die für einen pathologischen Befund kodieren (Herold 2018). Insbesondere wegen der Überschneidung der Abstandsbereiche für ein intaktes und lädiertes Band ist ein Schwellenwert sinnvoll, der mit einer entsprechenden Wahrscheinlichkeit eine Verletzung anzeigt. Für die ROC-Kurven der nativen Messpunkte (dorsal, Mitte, palmar) zeigte sich eine gute Testgüte (AUC 0,82/0,82/0,74) mit einem von gut (AUC minimal 0,6) bis exzellent (AUC maximal 0,92) reichenden Konfidenzintervall. Betrachtet man diesbezüglich die Differenz von rechter und linker Hand ließ sich eine Reduktion der Testgüte (AUC 0,67/0,71/0,74) feststellen mit Absinken des

Konfidenzintervalls in ausreichende (AUC minimal 0,45) bis gute sowie exzellente (AUC maximal 0,95) Bereiche. Ursächlich sind die teilweise vorkommenden paradoxen negativen Differenzen bei Läsion. Entsprechenden würde bei SL-Bandruptur ein geringerer Abstand als auf der gesunden Seite bestehen. Hier handelt es sich nur um wenige Fälle, die dennoch eine Auswirkung haben. In der Literatur finden sich für die Sonographie keine Berechnungen eines Schwellenwerts. Für das Röntgen, MRT und CT existieren hingegen Cut-off-Werte, welche eine Läsion anzeigen (Towfigh et al. 2011, Schmitt et al. 2015, Megerle und Machens 2015, Ramamurthy et al. 2016). Ein Vergleich der Methoden erscheint jedoch nicht sinnvoll, da bereits für die MRT gezeigt werden konnte, dass zwar ähnliche, jedoch keine äquivalenten Abstände bestehen. Unter Beachtung der Konfidenzintervalle (KI) kann eine Empfehlung zur Verwendung der Cut-off-Werte des dorsalen (KI 0,72 - 0,921) und mittleren (KI 0,723 – 0,917) Messpunkts bei nativen Abstandsmessungen ausgesprochen werden. Diese besitzen eine sehr hohe Sensitivität (dorsal 95 %, Mitte 100 %). Als Screeningkriterium für eine Verletzung sind sie somit sehr gut geeignet. Demgegenüber steht die geringe Spezifität (dorsal 60,4 %; Mitte 32,5 %). Um spezifischer eine Läsion zu diagnostizieren, sollten der palmare Messpunkt in Neutralstellung (Spezifität 85,4 %) sowie die Differenz von rechter und linker Hand im dorsalen (Spezifität 88,9 %) und eventuell des mittleren Messpunkts (Spezifität 77,8 %) verwendet werden.

6.2.6 Sonographischer SL-Band-Score

Es existieren zahlreiche Scores zur Beurteilung von Pathologien und als Kriterium zur Diagnosefindung (Herold 2018). Die Aussagekraft kann mithilfe der AUC sowie der Sensitivität und Spezifität angegeben werden. Exemplarisch soll im Folgenden der Vergleich des hier erstellten Scores mit dem Wells-Score dienen, welcher zum Ausschluss einer Lungenembolie verwendet wird (Herold 2018). Der Wells-Score besitzt eine Sensitivität von 63,8 % bis 79,3 % und eine Spezifität von 48,8 % bis 90 %. Die AUC beträgt 0,778 (95 % Konfidenzintervall 0,74 – 0,818). (Shen et al. 2016) Der

sonographische Score für eine SL-Bandruptur ist hingegen sensitiver (85 %) und besitzt eine hohe Spezifität (90 %). Die AUC ist mit 0,93 sehr gut. Im direkten Vergleich mit dem häufig im klinischen Alltag angewandten Wells-Score zeigt der hier erstellte sonographische SL-Band-Score eine exzellente Aussagekraft. Im Hinblick darauf sollte er somit eine relevante Anwendbarkeit des Ultraschalls als Methode zur Beurteilung des SL-Bandes ermöglichen und ein suffizientes Screeninginstrument bereitstellen.

6.3. Stellenwert der Diagnostika

Die möglichen Diagnostika zur Detektion einer SL-Band-Ruptur sind vielfältig. Der jeweilige Stellenwert der einzelnen Verfahren wird im Folgenden dargestellt und diskutiert.

6.3.1 Klinische Untersuchung

Der Scaphoid-Shift-Test kann Hinweise auf eine Verletzung liefern, ist jedoch nicht spezifisch für eine konkrete Läsion. So wurde von Easterling und Wolfe über einen positiven Test bei 32 % der unverletzten Patienten und 14 % asymmetrische Befunde (bei Untersuchung der Gegenseite) berichtet. (Easterling und Wolfe 1994) Als alleiniges Diagnostikum ist der klinische Test nicht geeignet. Er kann jedoch erste Hinweise bieten und weitere bildgebende Untersuchungen veranlassen.

6.3.2 Röntgen

Pliefke beschreibt für das Röntgen eine Sensitivität von 57,1 % und Spezifität von 98,3 %. Bei Durchführung einer Kinematographie wurde eine Sensitivität von 85,7 % und Spezifität von 95 % gefunden. (Pliefke 2008) Bei der Bewertung der Röntgenbilder hinsichtlich einer SL-Band Verletzung gehen verschiedene Kriterien ein. Unter der Annahme eines SL-Winkels über 60°, eines radiolunären Winkels über 12° und eines SL-Abstands über 2,5 oder 3 mm werden Sensitivitäten zwischen 43 % und 81 % sowie Spezifitäten von 80 % bis 93 % beschrieben. (Ramamurthy et al. 2016, Pliefke et al. 2008, Megerle et al. 2011, Sulkers et al. 2014) Der hohen Spezifität steht eine stark variierende Sensitivität gegenüber. Große Referenzwertbereiche,

abweichende Messmethoden und eine limitierte Interobserver Reliabilität schränken den Nutzen der Röntgendiagnostik ein (Ramamurthy et al. 2016, Gradl et al. 2013a, Kwon und Baek 2008). Ramamurthy et al. beschreiben die Stressaufnahmen als häufig eingesetzte Methode, welche jedoch keine starke wissenschaftliche Evidenzbasis hat (Ramamurthy et al. 2016). Insbesondere das Vorliegen von carpaler Laxizität bei asymptomatischen Individuen und die kleinen Unterschiede in Bezug auf den SL-Abstand bei intaktem und rupturiertem Band erschweren die klinische Signifikanz (Park 2002, Rimington et al. 2010, Ramamurthy et al. 2016). Es liegen keine Studien zur Genauigkeit von Stressaufnahmen bei Bandverletzungen vor (Toms et al. 2011, Ramamurthy et al. 2016).

6.3.3 Computertomographie

Die Computertomographie wird standardmäßig in der Detektion von Skaphoidfrakturen durchgeführt (Mehling und Sauerbier 2015). Eine native CT ist nicht zur Diagnostik von ligamentären Verletzungen geeignet. Durch den Einsatz von Kontrastmittel kann sie jedoch als Diagnostikum dienen. Es wird beschrieben, dass die CT-Arthrographie eine hohe Genauigkeit um 95 % erzielt (Prommersberger et al. 2014). Die Sensitivität für SL-Band-Rupturen wird zwischen 80 % bis 100 % angegeben (Ramamurthy et al. 2016, Lee et al. 2013a, Filippo et al. 2010, Bille et al. 2007, Moser et al. 2007). Im Vergleich zur MRA scheint die CT-Arthrographie Teilläsionen der intrinsischen Bänder besser zu detektieren (Ramamurthy et al. 2016, Moser et al. 2007, Schmitt et al. 2003).

Zusammenfassend kann man feststellen, dass durch den Einsatz von (intraartikulärem) Kontrastmittel eine hohe Genauigkeit und Sensitivität der CT erreicht wird. Problematisch erscheint hier jedoch die höhere Strahlenbelastung im Vergleich zum konventionellen Röntgen. Die Domäne ist jedoch vorwiegend im Bereich der Frakturdiagnostik zu sehen.

6.3.4 Magnetresonanztomographie

Bezüglich der Magnetresonanztomographie muss zwischen der nativen und der MR-Arthrographie unterschieden werden. Mehrere Autoren beschreiben für die native MRT eine schwierige Darstellbarkeit bei Partialläsionen des SL-Bandes (Davis und Blankenbaker 2010, Tanaka et al. 2008, Manton et al. 2001). Manton et al. beschreiben für vollständige Rupturen eine Sensitivität von 56 % und Spezifität von 56 % (Manton et al. 2001). Katschnig und Prosquill untersuchten eine kleine Gruppe von Patienten (N = 12) mittels MRT vor Arthroskopie und konnten nur in 42 % (N = 5) die richtige Diagnose stellen. Die Sensitivität der MRT war 36 %. (Katschnig und Prosquill 2006) Meier et al. fanden bei der Untersuchung von 125 Patienten mittels Arthro-MRT und anschließender Handgelenksarthroskopie eine Sensitivität von 72 % und Spezifität von 100 % für eine SL-Band-Läsion. In Bezug auf komplette SL-Bandrupturen wurde eine Sensitivität von 92 % und Spezifität von 100 % erreicht. Sie schlussfolgerten, dass die Wertigkeit der Arthro-MRT nahe der Arthroskopie als Goldstandard liegt. Komplikationen durch die intraartikuläre Kontrastmittelapplikation wurden nicht beschrieben. (Meier et al. 2002, Meier et al. 2005) Pliefke beschreibt für die MRT eine Sensitivität von 53,3 % und eine Spezifität von 90,9 %. Für die MR-Arthrographie wurden eine Sensitivität von 87,5 % und eine Spezifität von 75 % gefunden. (Pliefke 2008) Die native MRT erreicht gegenüber der Arthroskopie nur eine Nachweisrate von 55 %. Nach Gabe von Gadolinium i.v. wird diese auf 90 % gesteigert. Die MR-Arthrographie zeigt eine Sensitivität von Spezifität von 95 %. (Prommersberger et al. 2014) Auch Scheck et al. beschreiben eine bessere Sensitivität, Spezifität und Genauigkeit für die MR-Arthrographie (0.97/0.96/0.96) im Vergleich zur nativen MRT (0.81/0.75/0.77) (Scheck et al. 1999). Schmitt et al. geben für die MRA für Komplett rupturen eine Sensitivität von 91,7 % und Spezifität von 100% an, für Teilrupturen eine Sensitivität von 62,5% und Spezifität von 100 % (Schmitt et al. 2003). Ramamurthy et al. beschreiben nach Auswertung der Literatur eine Sensitivität der 1,5T-MRT von 70 % - 90 % (Hobby et al. 2001) beziehungsweise 25 % - 86 % (Ramamurthy et al. 2016). Für das 3T-MRT werden Sensitivitäten zwischen 65 % bis 89 %

beschrieben (Ramamurthy et al. 2016, Anderson et al. 2008, Spaans et al. 2013, Lee et al. 2013a, Magee 2009). Die 3T-MRT soll im Vergleich zur MR-Arthrographie eine ähnliche Genauigkeit erreichen (Ramamurthy et al. 2016, Chhabra et al. 2012). Die MRA besitzt im Vergleich zur Arthroskopie eine Sensitivität von 85 % bis 100 % und eine Spezifität von 80 % bis 100 % (Ramamurthy et al. 2016, Lee et al. 2013a, Lee et al. 2013b, Pahwa et al. 2014, Scheck et al. 1999). MRT und MRA besitzen nur eine geringe Sensitivität für Teilläsionen (Ramamurthy et al. 2016, Manton et al. 2001, Schmitt et al. 2003, Braun et al. 2003).

Limitierend für den Vergleich der Studien untereinander ist die Verwendung von unterschiedlichen Kernspintomographen und Untersuchungsprotokollen. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass zur Detektion von SL-Bandverletzungen eine 3T-MRT oder MR-Arthrographie gegenüber einer nativen Magnetresonanztomographie zu bevorzugen ist. Es können im Vergleich zur Arthroskopie eine hohe Genauigkeit, Sensitivität und Spezifität erreicht werden. 3T-MRT und MRA stellen somit ein sehr gutes Diagnostikum dar. Einschränkend sind die hohen Kosten und die Verfügbarkeit. Entscheidend ist die Frage, ob die MRT mit der dargelegten hohen Genauigkeit als Screeninguntersuchung geeignet ist oder die zuvor genannten Limitationen andere Verfahren an den Anfang der diagnostischen Kette stellen. Mit entsprechend hoher Sensitivität zur sicheren Erkennung aller Patienten mit Verletzung aber auch hoher Spezifität zur Filterung der Gesunden könnte der Ultraschall diese Rolle übernehmen.

6.3.5 Sonographie

Mohr et al. äußerten Bedenken zum wahren Wert der Sonographie für die Beurteilung einer carpalen Instabilität aufgrund einer SL-Bandverletzung. Insbesondere die Unterschiede in der Darstellbarkeit und die alleinige Betrachtung des dorsalen Anteils des dreiteiligen SL- Bandes als ein Band in einem Komplex von carpalen Stabilisatoren wurden kritisiert. Es wurde hinterfragt, welche diagnostischen oder therapeutischen Konsequenzen ein abnormaler oder normaler sonographischer Befund nach sich zieht. (Mohr et

al. 2003) Zum Zeitpunkt dieser Analyse existierten nur wenige Studien. Nachfolgend wurden weitere Untersuchungen durchgeführt und publiziert. Finlay et al. fanden eine Sensitivität und Spezifität (N=10) von jeweils 100 % für die Diagnose einer SL-Bandruptur (Finlay et al. 2004). Dao et al. fanden eine nur eine geringe Sensitivität von 46 %, jedoch eine hohe Spezifität von 100 % und eine Genauigkeit von 89 % und empfehlen die Sonographie als Ergänzung für andere diagnostische Methoden (Dao et al. 2004). Prommersberger beschreibt, dass mit hochfrequenten Schallköpfen (10-20 MHz) der dorsale Abschnitt des SL-Bandes in 90 % der Handgelenke dargestellt werden kann, jedoch eine fehlende Banddarstellung nicht sicher eine Bandruptur beweist. Er schlussfolgert daraus, dass die Sonographie in der Diagnostik bislang keine Rolle spielt. (Prommersberger et al. 2014) Es wird beschrieben, dass die Rolle des Ultraschalls zur SL-Banddiagnostik im klinischen Alltag noch unklar ist (Ramamurthy et al. 2016). Der Nutzen wird eher für spezialisierte Zentren gesehen oder wenn eine invasive Diagnostik abgelehnt wird oder ein postoperativer Zustand der Hand vorliegt. (Ramamurthy et al. 2016). Schlussfolgernd lässt sich feststellen, dass aktuell kein einheitliches Konzept zur sonographischen Beurteilung des scapholunären Bandes besteht und der Ultraschall kein Routineinstrument ist. Die in dieser Arbeit dargestellten Ergebnisse zeigen jedoch, insbesondere bei Verwendung des sonographischen SL-Band-Scores, ein hohes Potential zur Verwendung als Routinediagnostik.

6.3.6 Zusammenfassung

Ramamurthy et al. fassen in ihrer Metaanalyse zusammen, dass die MRT nur eine moderate Diagnostik zur Detektion von Verletzungen der intrinsischen Bänder der Hand bietet (vgl. Tabelle 9 Seite 53). Besser geeignet sind Magnetresonanz-Arthrographie und CTA, wobei ein 3T-MRT eine ähnliche Genauigkeit für Komplett rupturen zeigt. Allgemein sind Teilrupturen schwerer zu diagnostizieren als vollständige. (Ramamurthy et al. 2016) „Umstritten ist die Genauigkeit der kernspintomografischen Diagnostik außerhalb klinischer Studien. Falsch positive Befunde sind häufig, sodass diese Modalität, obwohl

sehr häufig durchgeführt, für den weiteren Therapieverlauf nicht zwangsläufig erforderlich scheint“ (Mayer et al. 2013). (Megerle und Machens 2015) Dieser Aspekt kann prinzipiell auf alle Untersuchungsmethoden übertragen werden, da die Betrachtung und Bewertung von Pathologien im Rahmen von Studien in der Regel durch Spezialisten auf dem Gebiet erfolgt. Eine vollständige Übertragbarkeit in die klinische Praxis scheint somit fraglich. (Ramamurthy et al. 2016) „Goldstandard der Diagnostik ist jedoch nach wie vor die Durchführung einer Handgelenksarthroskopie“ (Megerle und Machens 2015).

Insgesamt lässt sich feststellen, dass neben der Arthroskopie bisher kein alleiniges Diagnostikum existiert, welches sicher eine vollständige, aber auch Teilverletzung des scapholunären Bandes detektiert. Vielmehr wird die Diagnose in Zusammenschau der einzelnen Methoden gestellt. Technische und methodische Weiterentwicklungen führen jedoch zu einer besseren Aussagekraft der Verfahren.

6.4. Limitationen und methodische Einschränkungen

Die Rekrutierung der Patienten verlief prolongiert. Ursächlich war die niedrige Inzidenz für eine SL-Bandruptur beziehungsweise die begrenzte Anzahl an Patienten, welche aufgrund entsprechender Beschwerden eine weiterführende Diagnostik erhielten. Die mittels Sonographie untersuchten Patienten wurden entsprechend der abschließenden Diagnose in Gruppen unterteilt. Daraus resultieren beispielsweise, abhängig von der betrachteten Hypothese, Fallzahlen von 10 Patienten, welche statistisch ausgewertet wurden. Eine Ableitung von fixen Normwerten aus den Abstandsmessungen und Folgerung auf die Grundgesamtheit ist aus diesem Grund nicht möglich. Die dargestellten Messwerte stellen somit einen ersten Entwurf dar, welcher mit einer größeren Fallzahl verifiziert und gegebenenfalls angepasst werden muss. Die Durchführung und Beurteilung einer Sonographie ist untersucherabhängig. Mit zunehmender Anzahl an Untersuchungen nimmt die Erfahrung und Expertise zu. Insbesondere während der Anfangsphase können somit Unsicherheiten in Bezug auf die adäquate Darstellung und Beurteilung auftreten. Zur Minimierung dieses Effekts wurden für die hier vorliegende

Studie erfahrene Ultraschalluntersucher hinzugezogen. Dennoch kann auf Grund der bisher nicht standardmäßigen Verwendung von einem gewissen Lerneffekt, welcher quantitativ nicht beurteilt werden kann, ausgegangen werden. Dies ist auch im Hinblick auf die klinische Anwendbarkeit von Bedeutung. Unerfahrene Untersucher werden potentiell längere Untersuchungszeiten haben und vermutlich zu mehr Fehleinschätzungen gelangen. Jedoch ist davon der gesamte Ultraschall als Verfahren mit steiler Lernkurve betroffen und nicht eine alleinige Beschränkung auf die hier dargestellte sonographische SL-Band-Beurteilung.

In Bezug auf die Einstellung der korrekten Ebene aber auch durch anatomische Besonderheiten oder vorhandene Pathologien können sich für die Abstandsmessung Schwierigkeiten ergeben. Je nach Anschnitt der Knochen und deren unregelmäßige Form entstehen unterschiedliche Längen (Abbildung 56). In der schematischen Darstellung stellen die Ellipsen exemplarisch Handwurzelknochen dar und die schwarzen Linien die Position des Schallkopfs in der Ansicht von transversal. Die Strecke S' ist länger als S'' . Dies lässt sich auch für den Fall von unterschiedlichen Knochendrehungen, wie sie bei Fehlstellungen (DISI, PISI) entstehen, nachvollziehen (Abbildung 57). Eine ähnliche Problematik zeigen jedoch auch andere Verfahren (Kwon und Baek 2008). Durch ein einheitliches Messkonzept wurde versucht diesem Umstand entgegenzuwirken. Dennoch wird dieser Effekt nicht gänzlich vermeidbar sein. Insbesondere Ausreißer der Abstandsmesswerte lassen sich so erklären.

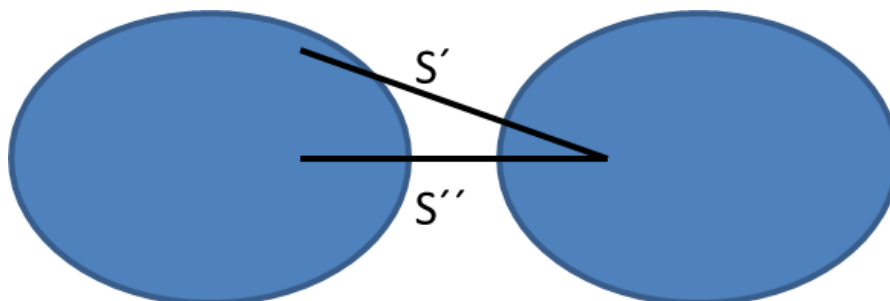


Abbildung 56: Schematische Darstellung abweichender Abstände durch unterschiedliche Schnittebenen in der Ansicht von transversal

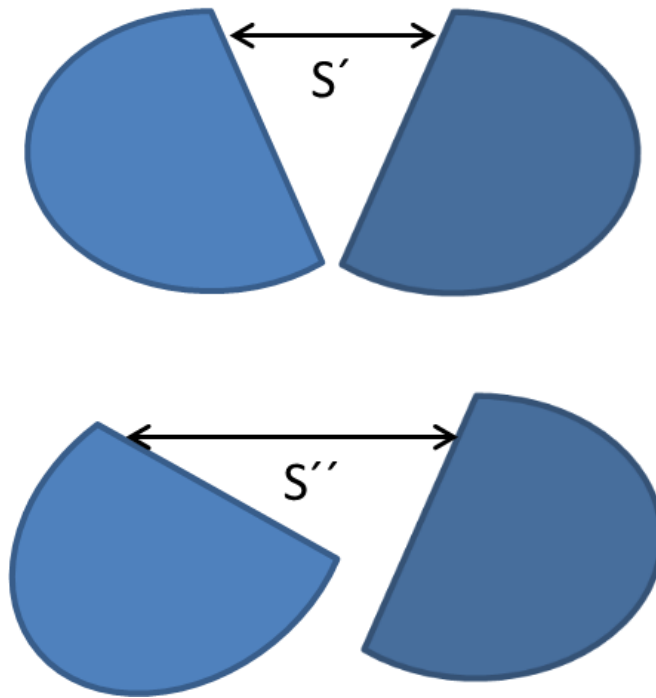


Abbildung 57: Schematische Darstellung abweichender Abstände durch unterschiedliche Knochendrehung in der Ansicht von coronal

6.5. Ausblick

Wie bereits dargestellt, ist eine frühzeitige und genaue Diagnostik einer scapholunären Bandläsion wichtig. Liegt diese als Begleitverletzung einer distalen (intraartikulären) Radiusfraktur vor, wird beispielsweise eine gleichzeitige operative Versorgung des Bandes empfohlen, da so funktionelle Einschränkungen und sekundäre Folgeschäden vermieden werden können (Gradl et al. 2013b). Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit einer adäquaten Screeningmethode. Mit Hilfe des erstellten Scores sollte eine klinische Beurteilungsgrundlage vorhanden sein. Dieser muss jedoch in der Praxis getestet werden und Bedarf im Verlauf Anpassungen der Parameter. Insbesondere durch höhere Fallzahlen werden voraussichtlich die Abstandsbereiche und Cut-off-Werte angepasst werden. Eine anschließende Kontrolle mittels geeigneter MRT oder MR-Arthrographie ist zu empfehlen. Insbesondere durch die Verwendung von 3-Tesla Geräten, Handspulen, dreidimensional-isovolumetrischen Sequenzen und schnellen Bilderzeugungszeiten mit hohem räumlichen Kontrast und hoher Auflösung werden gute Ergebnisse erzielt (Ramamurthy et al. 2016, Chhabra et al. 2012, Lee et al. 2013b, Pahwa et al. 2014). Es bleibt jedoch der Kostenfaktor und die Verfügbarkeit der genannten Magnetresonanztomographen zu diskutieren.

Mit Hilfe der Sonographie könnte nun eine gute Screeningmethode zur Verfügung stehen, welche bei pathologischen Befunden eine weitere Diagnostik initiiert.

7. Schlussfolgerung

Zur sonographischen Untersuchung des scapholunären Bandes sollte ein standardisierter Ablauf eingehalten werden, welcher durch verschiedene Handpositionen, Funktionsbewegungen und Schnittebenen eine Darstellung und Messung des SL-Spalts erlaubt.

Die hier dargestellten Ergebnisse zeigen, dass ein intaktes scapholunäres Band sonographisch darstellbar ist. Dieses zeigt sich als hyperechogene, fibrilläre Struktur zwischen Os scaphoideum und Os lunatum. Eine Darstellung gelingt dorsal besser als palmar. Der proximale Anteil ist sonographisch nicht zugänglich. Gelingt eine eindeutige kontinuierliche Darstellung nicht, liegt nicht zwangsläufig eine vollständige Ruptur vor. Ein hypoechogenes Areal zwischen den beiden Handwurzelknochen oder eine diskontinuierliche Darstellung sind jedoch suspekt für eine Verletzung. Insbesondere der Seitenvergleich mit der gesunden Hand hilft hier bei der Beurteilung. Unterschiede zwischen den Händen, vor allem mit auf der betroffenen Seite nicht darstellbarem Band, weisen auf eine Läsion hin.

Zur weiteren Differenzierung ist die Betrachtung des Abstands empfehlenswert. Dieser sollte an den definierten Messpunkten bestimmt werden. Werte dorsal über 5,05 mm, Mitte über 1,95 mm und palmar über 6,15 mm zeigen mit unterschiedlicher Sensitivität und Spezifität eine Ruptur an. Dabei ermöglicht der mittlere Abstand die zuverlässigste Aussage und bietet die höchste Sensitivität von 100 %. Zur Spezifizierung ist der palmare Abstand am geeignetsten (Spezifität 85,4 %). Wiederrum hilft der Seitenvergleich bei der Beurteilung. Allgemein sind hier spezifischere Aussagen möglich. Eine Abstandsdifferenz von rechter und linker Hand über 1,15 mm dorsal hat dabei die höchste richtig-positiv Rate (Spezifität 88,9 %). Als Screeningparameter sind die Differenzen jedoch aufgrund der, im Vergleich zu den nativen Werten, niedrigeren Sensitivität weniger geeignet.

Die Funktionsaufnahmen in Radialduktion und Ulnarduktion zeigen in der Regel der physiologischen Kinematik entsprechende Abstandswerte. Jedoch kann auch ein unvorhersehbares Verhalten beobachtet werden, wodurch eine Abstandsmessung zur Diagnostik nicht zu empfehlen ist. Der Nutzen liegt vielmehr in der dynamischen Untersuchung zur Veränderung der Bandspannung und Verhinderung eines Einschlagens von extrinsischen karpalen Bändern.

Im Vergleich zu anderen Diagnostika stimmt die sonographische Darstellung eines intakten oder rupturierten SL-Bandes gut bis sehr gut überein. Bezüglich des SL-Abstands messen MRT und Sonographie ähnlich. Sie sind jedoch nicht als äquivalent anzusehen.

Eine kombinierte Betrachtung und Anwendung der aufgeführten Parameter erlaubt der sonographische SL-Band-Score. Mit einer Sensitivität von 85 % und eine Spezifität von 90 % erlaubt er eine adäquate Beurteilung des scapholunären Bandes hinsichtlich der Intaktheit. Als Basis für die Auswertung kann der gewählte Score die Sonographie als Screeningmethode für eine Verletzung etablieren. Entsprechend sollte im Falle einer wahrscheinlichen Läsion eine fortführende Diagnostik erfolgen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Sonographie zur Darstellung und Beurteilung des scapholunären Bandes geeignet ist. Es wurden mehrere Kriterien mit entsprechenden Parametern berücksichtigt und vorgeschlagen.

8. Literatur- und Quellenverzeichnis

- Altman D 1999. Practical statistics for medical research. Boca Raton, Fla: Chapman & Hall/CRC.
- Anderson M, Skinner J, Felmlee J, Berger R, Amrami K 2008. Diagnostic comparison of 1.5 Tesla and 3.0 Tesla preoperative MRI of the wrist in patients with ulnar-sided wrist pain. The Journal of Hand Surgery, 33(7): 1153–1159.
- Arastéh K, Baenkler H-W 2013. Duale Reihe. Innere Medizin. Dritte Aufl. Stuttgart: Thieme.
- Aumüller G, Aust G, Doll A, Engele J, Joachim K, Mense S, Reißig D, Salvetter J, Schmidt W, Schmitz F, Schulte E, Spaniel-Borowski K, Wolff W, Wurzing L, Zilch H-G 2010. Duale Reihe. Anatomie. Zweite Aufl. Stuttgart: Thieme.
- Berger R 1996. The gross and histologic anatomy of the scapholunate interosseous ligament. The Journal of Hand Surgery, 21(2): 170–178.
- Berger R, Blair W, Crowninshield R, Flatt A 1982. The scapholunate ligament. The Journal of Hand Surgery, 7(1): 87–91.
- Bickert B, Kneser U 2015. Verletzungen der Handwurzel und deren Spätfolgen. Trauma und Berufskrankheit, 17(S2): 334–337.
- Bille B, Harley B, Cohen H 2007. A comparison of CT arthrography of the wrist to findings during wrist arthroscopy. The Journal of Hand Surgery, 32(6): 834–841.
- Bland J, Altman D 1999. Measuring agreement in method comparison studies. Statistical methods in medical research, 8(2): 135–160.
- Boutry N, Lapegue F, Masi L, Claret A, Demondion X, Cotten A 2005. Ultrasonographic evaluation of normal extrinsic and intrinsic carpal ligaments: preliminary experience. Skeletal radiology, 34(9): 513–521.
- Branco J 2013. The scapholunate ligament complex. Journal of wrist surgery, 2(3): 282.
- Braun H, Kenn W, Schneider S, Graf M, Sandstede J, Hahn D 2003. Direkte MR-Arthrographie des Handgelenkes - Wertigkeit im Nachweis von Komplet- und Partialdefekten der intrinsischen Ligamente und des TFCC im Vergleich zur Arthroskopie. RöFo - Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen und der bildgebenden Verfahren, 175(11): 1515–1524.

- Burns J, Tanaka T, Ueno T, Nakamura T, Yoshioka H 2011. Pitfalls that may mimic injuries of the triangular fibrocartilage and proximal intrinsic wrist ligaments at MR imaging. *Radiographics : a review publication of the Radiological Society of North America, Inc*, 31(1): 63–78.
- Chhabra A, Soldatos T, Thawait G, Del Grande F, Thakkar R, Means K, Carrino J 2012. Current perspectives on the advantages of 3-T MR imaging of the wrist. *Radiographics : a review publication of the Radiological Society of North America, Inc*, 32(3): 879–896.
- Cooney W 2010. *The wrist*. Zweite Aufl. Philadelphia: Wolters Kluwer/Lippincott Williams & Wilkins Health.
- Daffner R, Emmerling E, Buterbaugh G 1992. Proximal and distal oblique radiography of the wrist. *The Journal of Hand Surgery*, 17(3): 499–503.
- Dao K, Solomon D, Shin A, Puckett M 2004. The efficacy of ultrasound in the evaluation of dynamic scapholunate ligamentous instability. *The Journal of bone and joint surgery. American volume*, 86-A(7): 1473–1478.
- Davis K, Blankenbaker D 2010. Imaging the ligaments and tendons of the wrist. *Seminars in roentgenology*, 45(3): 194–217.
- Easterling K, Wolfe S 1994. Scaphoid shift in the uninjured wrist. *The Journal of Hand Surgery*, 19(4): 604–606.
- Filippo M de, Pogliacomi F, Bertellini A, Araoz P, Aversa R, Sverzellati N, Ingegnoli A, Corradi M, Costantino C, Zompatori M 2010. MDCT arthrography of the wrist. *European Journal of Radiology*, 74(1): 221–225.
- Finlay K, Lee R, Friedman L 2004. Ultrasound of intrinsic wrist ligament and triangular fibrocartilage injuries. *Skeletal radiology*, 33(2): 85–90.
- Forward D, Lindau T, Melsom D 2007. Intercarpal ligament injuries associated with fractures of the distal part of the radius. *The Journal of bone and joint surgery. American volume*, 89(11): 2334–2340.
- Frank J, Sander A, Lehnert M, Marzi I 2015. Ligamentäre Verletzungen der Handwurzel. *Trauma und Berufskrankheit*, 17(S2): 345–352.
- Garcia-Elias M, Berger R, Horii E, Kauer J 1999. Definition of carpal instability. The Anatomy and Biomechanics Committee of the International Federation of Societies for Surgery of the Hand. *The Journal of Hand Surgery*, 24(4): 866–867.
- Geissler W, Freeland A, Savoie F, McIntyre L, Whipple T 1996. Intracarpal soft-tissue lesions associated with an intra-articular fracture of the distal end of the radius. *The Journal of bone and joint surgery. American volume*, 78(3): 357–365.

- Gradl G, Neuhaus V, Fuchsberger T, Guitton T, Prommersberger K-J, Ring D 2013a. Radiographic diagnosis of scapholunate dissociation among intra-articular fractures of the distal radius. *The Journal of Hand Surgery*, 38(9): 1685–1690.
- Gradl G, Pillukat T, Fuchsberger T, Knobe M, Ring D, Prommersberger K-J 2013b. The functional outcome of acute scapholunate ligament repair in patients with intraarticular distal radius fractures treated by internal fixation. *Archives of orthopaedic and trauma surgery*, 133(9): 1281–1287.
- Green D 2005. *Green's operative hand surgery*. fünfte Aufl. Philadelphia: Elsevier-Churchill Livingstone.
- Griffith J, Chan D, Ho P, Zhao L, Hung L, Metreweli C 2001. Sonography of the normal scapholunate ligament and scapholunate joint space. *Journal of Clinical Ultrasound*, 29(4): 223–229.
- Hagert E, Garcia-Elias M, Forsgren S, Ljung B-O 2007. Immunohistochemical analysis of wrist ligament innervation in relation to their structural composition. *The Journal of Hand Surgery*, 32(1): 30–36.
- Hagert E, Ljung B, Forsgren S 2004. General innervation pattern and sensory corpuscles in the scapholunate interosseous ligament. *Cells, tissues, organs*, 177(1): 47–54.
- Henderson R, Walker B, Young K 2015. The accuracy of diagnostic ultrasound imaging for musculoskeletal soft tissue pathology of the extremities. *Chiropractic & manual therapies*, 23(): 31.
- Henne-Bruns D, Barth E 2012. *Duale Reihe. Chirurgie*. Vierte Aufl. Stuttgart: Thieme.
- Herold G, Hrsg. 2018. *Innere Medizin 2018*. Köln: Gerd Herold.
- Hobby J, Tom B, Bearcroft P, Dixon A 2001. Magnetic resonance imaging of the wrist. *Clinical radiology*, 56(1): 50–57.
- Hoffmann R 2009. *Checklisten der aktuellen Medizin. Checkliste Handchirurgie*. 3., vollst. überarb. Aufl. Aufl. Stuttgart, New York, NY: Thieme.
- Jacobson J, Oh E, Propeck T, Jebson P, Jamadar D, Hayes C 2002. Sonography of the scapholunate ligament in four cadaveric wrists: correlation with MR arthrography and anatomy. *AJR. American journal of roentgenology*, 179(2): 523–527.
- Johnston R, Seiler J, Miller E, Drvaric D 1995. The intrinsic and extrinsic ligaments of the wrist. A correlation of collagen typing and histologic

- appearance. Journal of hand surgery (Edinburgh, Scotland), 20(6): 750–754.
- Jørgsholm P, Thomsen N, Björkman A, Besjakov J, Abrahamsson S-O 2010. The incidence of intrinsic and extrinsic ligament injuries in scaphoid waist fractures. The Journal of Hand Surgery, 35(3): 368–374.
- Jotanovic Z, Halsey T, Saeed M, Kakkar R, Swaminathan R, Nowicki P 2014. EWAS Wrist Arthroscopy Tour 2014. Journal of wrist surgery, 3(3): 216–217.
- Kalb K, Prommersberger K-J 2009. Die vollständige Versteifung des Handgelenks mit der AO-Handgelenk-Arthrodesenplatte. Operative Orthopädie und Traumatologie, 21(4-5): 498–509.
- Katschnig I, Prosquill E 2006. Handgelenkarthroskopie: Aussage des MRT verglichen mit der Arthrographie und tatsächlicher Befund bei der Arthroskopie -- Eine Studie der Jahre 1998 bis 2003. Handchirurgie, Mikrochirurgie, plastische Chirurgie : Organ der Deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft für Handchirurgie : Organ der Deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft für Mikrochirurgie der Peripheren Nerven und Gefäße : Organ der Vereinigung der Deutschen Plastischen Chirurgen, 38(2): 104–108.
- Kendi A, Güdemez E 2006. Sonographic evaluation of scapholunate ligament: value of tissue harmonic imaging. Journal of clinical ultrasound : JCU, 34(3): 109–112.
- Klempka A, Wagner M, Fodor S, Prommersberger K, Uder M, Schmitt R 2016. Injuries of the scapholunate and lunotriquetral ligaments as well as the TFCC in intra-articular distal radius fractures. Prevalence assessed with MDCT arthrography. European radiology, 26(3): 722–732.
- Koo T, Li M 2016. A Guideline of Selecting and Reporting Intraclass Correlation Coefficients for Reliability Research. Journal of chiropractic medicine, 15(2): 155–163.
- Kumar R, Indrayan A 2011. Receiver operating characteristic (ROC) curve for medical researchers. Indian pediatrics, 48(4): 277–287.
- Kwiecien R, Kopp-Schneider A, Blettner M 2011. Concordance analysis. Deutsches Ärzteblatt international, 108(30): 515–521.
- Kwon B, Baek G 2008. Fluoroscopic diagnosis of scapholunate interosseous ligament injuries in distal radius fractures. Clinical orthopaedics and related research, 466(4): 969–976.
- Larsen C, Amadio P, Gilula L, Hodge J 1995. Analysis of carpal instability: I. Description of the scheme. The Journal of Hand Surgery, 20(5): 757–764.

- Lee R, Ng A, Tong C, Griffith J, Tse W, Wong C, Ho P 2013a. Intrinsic ligament and triangular fibrocartilage complex tears of the wrist. *Skeletal radiology*, 42(9): 1277–1285.
- Lee Y, Choi Y, Kim S, Song H-T, Suh J-S 2013b. Intrinsic ligament and triangular fibrocartilage complex (TFCC) tears of the wrist. *Magnetic resonance imaging*, 31(2): 221–226.
- Lichtman D, Schneider J, Swafford A, Mack G 1981. Ulnar midcarpal instability—Clinical and laboratory analysis. *The Journal of Hand Surgery*, 6(5): 515–523.
- Luegmair M, Saffar P 2013. Scaphocapitate arthrodesis for treatment of scapholunate instability in manual workers. *The Journal of Hand Surgery*, 38(5): 878–886.
- Lutz H 2007. *Ultraschallfibel Innere Medizin*. 3. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Lützkendorf K 2009. Zum Stellenwert der Magnetresonanztomographie in der Diagnostik von Skaphoidfrakturen [Dissertation].
- Magee T 2009. Comparison of 3-T MRI and arthroscopy of intrinsic wrist ligament and TFCC tears. *AJR. American journal of roentgenology*, 192(1): 80–85.
- Manton G, Schweitzer M, Weishaupt D, Morrison W, Osterman A, Culp R, Shabshin N 2001. Partial interosseous ligament tears of the wrist. *Journal of computer assisted tomography*, 25(5): 671–676.
- Martini A, Daecke W, Blumenthal-Friedrich K, Zboril A 2011. *Traumatologische Handchirurgie*. Berlin: Springer Medizin.
- Mayer S, Hahn P, Bruckner T, Unglaub F 2013. Aussagekraft präoperativer MRT-Diagnostik hinsichtlich Läsionen des skapholunären Bandes im klinischen Alltag. *Handchirurgie · Mikrochirurgie · Plastische Chirurgie*, 45(1): 26–32.
- Megerle K, Machens H-G 2015. Die differenzierte Therapie karpaler Bandverletzungen. *OP-JOURNAL*, 31(02): 114–118.
- Megerle K, Pöhlmann S, Kloeters O, Germann G, Sauerbier M 2011. The significance of conventional radiographic parameters in the diagnosis of scapholunate ligament lesions. *European radiology*, 21(1): 176–181.
- Mehling I, Sauerbier M 2015. Knöcherne Verletzungen der Handwurzel. *Trauma und Berufskrankheit*, 17(S2): 338–344.
- Meier R, Schmitt R, Christopoulos G, Krimmer H 2002. Darstellung skapholunärer Verletzungen im Arthro-MRT im Vergleich zur

- Handgelenkarthroskopie. Handchirurgie, Mikrochirurgie, plastische Chirurgie : Organ der Deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft für Handchirurgie : Organ der Deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft für Mikrochirurgie der Peripheren Nerven und Gefäße : Organ der Vereinigung der Deutschen Plastischen Chirurgen, 34(6): 381–385.
- Meier R, Schmitt R, Krimmer H 2005. Handgelenkläsionen in der direkten MR-Arthrographie im Vergleich zur Arthroskopie des Handgelenks. *Handchirurgie · Mikrochirurgie · Plastische Chirurgie*, 37(2): 85–89.
- Messina J, van Overstraeten L, Luchetti R, Fairplay T, Mathoulin C 2013. The EWAS Classification of Scapholunate Tears: An Anatomical Arthroscopic Study. *Journal of wrist surgery*, 2(2): 105–109.
- Mohr A, Guermazi A, Genant H 2003. Value of sonography of the scapholunate ligament. *AJR. American journal of roentgenology*, 181(1): 275.
- Moosbrugger H, Kelava A 2012. Springer-Lehrbuch. Testtheorie und Fragebogenkonstruktion. 2., aktualisierte und überarbeitete Auflage Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Moser T, Dosch J, Moussaoui A, Buy X, Gangi A, Dietemann J 2008. Multidetector CT arthrography of the wrist joint: how to do it. *Radiographics : a review publication of the Radiological Society of North America, Inc*, 28(3): 787-800; quiz 911.
- Moser T, Dosch J-C, Moussaoui A, Dietemann J-L 2007. Wrist ligament tears. *AJR. American journal of roentgenology*, 188(5): 1278–1286.
- Navarro A 1937. *Ann Inst Clin Quir Chir Exp* 1. Anatomia y fisiologia del carpo.
- Neubrech F, Muhldorfer-Fodor M, Pillukat T, van Schoonhoven J, Prommersberger K 2012. Long-term results after midcarpal arthrodesis. *Journal of wrist surgery*, 1(2): 123–128.
- Niethard F, Pfeil J, Biberthaler P 2014. *DUALE REIHE* Herausgegeben von Alexander Bob und Konstantin Bob. Duale Reihe Orthopädie und Unfallchirurgie. Siebente Aufl. Stuttgart: Thieme.
- Obdeijn M, Tuijthof G, van der Horst, Chantal M A M, Mathoulin C, Liverneaux P 2013. Trends in wrist arthroscopy. *Journal of wrist surgery*, 2(3): 239–246.
- Ohno E, Kawashima H, Hashimoto S, Goto H, Hirooka Y 2015. Current status of tissue harmonic imaging in endoscopic ultrasonography (EUS) and EUS-elastography in pancreatobiliary diseases. *Digestive endoscopy : official journal of the Japan Gastroenterological Endoscopy Society*, 27 Suppl 1(): 68–73.

- Pahwa S, Srivastava D, Sharma R, Gamanagatti S, Kotwal P, Sharma V 2014. Comparison of conventional MRI and MR arthrography in the evaluation of wrist ligament tears. *The Indian Journal of Radiology & Imaging*, 24(3): 259–267.
- Park M 2002. Normal anteroposterior laxity of the radiocarpal and midcarpal joints. *The Journal of bone and joint surgery. British volume*, 84(1): 73–76.
- Perkins N, Schisterman E 2005. The Youden Index and the Optimal Cut-Point Corrected for Measurement Error. *Biometrical Journal*, 47(4): 428–441.
- Perkins N, Schisterman E 2006. The inconsistency of "optimal" cutpoints obtained using two criteria based on the receiver operating characteristic curve. *American journal of epidemiology*, 163(7): 670–675.
- Pliefke J 2008. Die bildgebende Diagnostik der skapholunären Dissoziation unter besonderer Berücksichtigung der Kinematographie [Dissertation]. Berlin: Medizinische Fakultät Charité.
- Pliefke J, Stengel D, Rademacher G, Mutze S, Ekkernkamp A, Eisenschenk A 2008. Diagnostic accuracy of plain radiographs and cineradiography in diagnosing traumatic scapholunate dissociation. *Skeletal radiology*, 37(2): 139–145.
- Prommersberger K-J, Mühldorfer-Fodor M, Kalb K, Schmitt R, van Schoonhoven J 2014. Die skapholunäre Bandverletzung. *Der Unfallchirurg*, 117(8): 723-37; quiz 738-9.
- Ramamurthy N, Chojnowski A, Toms A 2016. Imaging in carpal instability. *The Journal of hand surgery, European volume*, 41(1): 22–34.
- Reiser M, Kuhn F-P, Debus J 2011. Duale Reihe. Radiologie. Dritte Aufl. Stuttgart: Thieme.
- Renoux J, Zeitoun-Eiss D, Brasseur J-L 2009. Ultrasonographic Study of Wrist Ligaments: Review and New Perspectives. *Seminars in Musculoskeletal Radiology*, 13(01): 55–65.
- Rimington T, Edwards S, Lynch T, Pehlivanova M 2010. Intercarpal ligamentous laxity in cadaveric wrists. *The Journal of bone and joint surgery. British volume*, 92(11): 1600–1605.
- Sattler H, Harland U 1988. Arthrosonographie. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg.
- Sattler H, Rehart S 1997. Arthrosonographie und klinischer Befund. Köln: Dt. Ärzte-Verl.

- Scheck R, Romagnolo A, Hierner R, Pfluger T, Wilhelm K, Hahn K 1999. The carpal ligaments in MR arthrography... [J Magn Reson Imaging. 1999] - PubMed - NCBI().
- Schimmerl-Metz S, Metz V, Totterman S, Mann F, Gilula L 1999. Radiologic measurement of the scapholunate joint. The Journal of Hand Surgery, 24(6): 1237–1244.
- Schmidt H-M 2003. Chirurgische Anatomie der Hand. 2., überarb. und aktualisierte Aufl. Aufl. Stuttgart: Thieme.
- Schmitt R, Christopoulos G, Meier R, Coblenz G, Fröhner S, Lanz U, Krimmer H 2003. Direkte MR-Arthrographie des Handgelenks im Vergleich zur Arthroskopie: Eine prospektive Studie an 125 Patienten. RöFo - Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen und der bildgebenden Verfahren, 175(7): 911–919.
- Schmitt R, Fröhner S, Fodor S, Christopoulos G, Kalb K 2006. Radiologische Frühdiagnostik der skapholunären Dissoziation (SLD). Der Radiologe, 46(8): 654–663.
- Schmitt R, Lanz U, Christopoulos G 2015. Bildgebende Diagnostik der Hand. dritte Aufl. Stuttgart: Thieme.
- Schünke M, Schulte E, Schumacher U, Voll M, Wesker K 2007. Prometheus: LernAtlas der Anatomie. Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem. Zweite Aufl. Stuttgart, New York: Thieme.
- Shen J-H, Chen H-L, Chen J-R, Xing J-L, Gu P, Zhu B-F 2016. Comparison of the Wells score with the revised Geneva score for assessing suspected pulmonary embolism. Journal of thrombosis and thrombolysis, 41(3): 482–492.
- Siebert C, Siebert D 2018. Pocket guides to social work research methods. Data analysis with small samples and non-normal data. New York: Oxford University Press.
- Slutsky D, Trevare J 2014. Scapholunate and lunotriquetral injuries: arthroscopic and open management. Sports medicine and arthroscopy review, 22(1): 12–21.
- Smith D 1994. Scapholunate interosseous ligament of the wrist: MR appearances in asymptomatic volunteers and arthrographically normal wrists. Radiology, 192(1): 217–221.
- Sokolow C, Saffar P 2001. Anatomy and histology of the scapholunate ligament. Hand clinics, 17(1): 77–81.

- Spaans A, van Minnen P, Prins H, Korteweg M, Schuurman A 2013. The value of 3.0-tesla MRI in diagnosing scapholunate ligament injury. *Journal of wrist surgery*, 2(1): 69–72.
- Steinmann B, Gitzelmann R 1984. Vererbte Krankheiten mit Bandlaxität. *Der Orthopäde*, 13(1): 9–18.
- Strobel U, Tami I, Andreisek G, Giovanoli P, Calcagni M 2014. Vergleich der funktionellen Resultate mit MRT-Befunden nach operativer Versorgung von transskaphoidalen perilunären Luxationsfrakturen: Die Rolle von skapholunären Bandläsionen. *Handchirurgie, Mikrochirurgie, plastische Chirurgie : Organ der Deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft für Handchirurgie : Organ der Deutschsprachigen Arbeitsgemeinschaft für Mikrochirurgie der Peripheren Nerven und Gefäße : Organ der Vereinigung der Deutschen Plastischen Chirurgen*, 46(3): 169–176.
- Sulkers G, Schep N, Maas M, van der Horst C, Goslings J, Strackee S 2014. The diagnostic accuracy of wrist cineradiography in diagnosing scapholunate dissociation. *The Journal of hand surgery, European volume*, 39(3): 263–271.
- Szabo R 2008. Scapholunate ligament repair with capsulodesis reinforcement. *The Journal of Hand Surgery*, 33(9): 1645–1654.
- Taleisnik J 1985. *The Wrist*. Churchill Livingstone, Edinburgh.
- Taleisnik J 1988. Current concepts review. Carpal instability. *The Journal of bone and joint surgery. American volume*, 70(8): 1262–1268.
- Taljanovic M, Goldberg M, Sheppard J, Rogers L 2011. US of the Intrinsic and Extrinsic Wrist Ligaments and Triangular Fibrocartilage Complex--Normal Anatomy and Imaging Technique. *Radiographics*, 31(1): 79–80.
- Taljanovic M, Sheppard J, Jones M, Switlick D, Hunter T, Rogers L 2008. Sonography and sonoarthrography of the scapholunate and lunotriquetral ligaments and triangular fibrocartilage disk: initial experience and correlation with arthrography and magnetic resonance arthrography. *Journal of ultrasound in medicine : official journal of the American Institute of Ultrasound in Medicine*, 27(2): 179–191.
- Tanaka T, Ogino S, Yoshioka H 2008. Ligamentous injuries of the wrist. *Seminars in Musculoskeletal Radiology*, 12(4): 359–377.
- Toms A, Chojnowski A, Cahir J 2011. Midcarpal instability. *Skeletal radiology*, 40(5): 533–541.
- Toprak H, Kiliç E, Serter A, Kocakoç E, Ozgocmen S 2014. Ultrasound and Doppler US in Evaluation of Superficial Soft-tissue Lesions. *Journal of clinical imaging science*, 4(): 12.

- Towfigh H, Hierner R, Langer M, Friedel R 2011. Handchirurgie. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Vogt P M., Hrsg. 2011. Praxis der Plastischen Chirurgie. Erste Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Watson H, Ashmead D, 4th., Makhlouf M 1988. Examination of the scaphoid. The Journal of Hand Surgery, 13(5): 657–660.
- Weber O, Burger C, Graf M, Muhr G, Rangger C 2006. Die bipolare Unterarmverrenkungsverletzung. Der Unfallchirurg, 109(7): 600–604.
- Weiß C 2013. Basiswissen Medizinische Statistik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Widder B, Görtler M 2015. Doppler- und Duplexsonographie der hirnersorgenden Arterien. 6. Aufl. 2004, kart. Sonderausg Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Wirtz M, Caspar F 2002. Beurteilerübereinstimmung und Beurteilerreliabilität. Göttingen: Hogrefe Verl. für Psychologie.
- Wolfe S, Crisco J 1994. Mechanical evaluation of the scaphoid shift test. The Journal of Hand Surgery, 19(5): 762–768.
- Zlatkin M, Rosner J 2006. MR imaging of ligaments and triangular fibrocartilage complex of the wrist. Radiologic clinics of North America, 44(4): 595-623, ix.

9. Anhang

Tabellen

Tabelle 24: Koordinaten der ROC-Kurve (Abbildung 54, Seite 73)

dorsal						Mitte						palmar				
Positiv, wenn ≥ 1	Sensitivität	1 - Spezifität	Spezifität	Youden- Index	Positiv, wenn ≥ 1	Sensitivität	1 - Spezifität	Spezifität	Youden- Index	Positiv, wenn ≥ 1	Sensitivität	1 - Spezifität	Spezifität	Youden- Index		
-2	1	1	0	0	-1,8	1	1	0	0	-2,5	1	1	0	0		
-0,9	1	0,889	0,111	0,111	-0,65	0,95	1	0	-0,05	-1,4	1	0,889	0,111	0,111		
-0,5	1	0,778	0,222	0,222	-0,4	0,95	0,889	0,111	0,061	-0,95	0,95	0,889	0,111	0,061		
-0,15	0,95	0,778	0,222	0,172	-0,25	0,95	0,778	0,222	0,172	-0,4	0,95	0,778	0,222	0,172		
-0,05	0,95	0,667	0,333	0,283	-0,2	0,9	0,778	0,222	0,122	-0,05	0,9	0,778	0,222	0,122		
0,1	0,9	0,667	0,333	0,233	-0,1	0,85	0,778	0,222	0,072	0,1	0,9	0,556	0,444	0,344		
0,25	0,85	0,556	0,444	0,294	0,05	0,75	0,667	0,333	0,083	0,2	0,9	0,444	0,556	0,456		
0,35	0,8	0,556	0,444	0,244	0,15	0,75	0,556	0,444	0,194	0,35	0,85	0,333	0,667	0,517		
0,45	0,75	0,556	0,444	0,194	0,2	0,75	0,444	0,556	0,306	0,45	0,75	0,333	0,667	0,417		
0,55	0,6	0,556	0,444	0,044	0,25	0,7	0,333	0,667	0,367	0,55	0,65	0,333	0,667	0,317		
0,65	0,5	0,444	0,556	0,056	0,3	0,7	0,222	0,778	0,478	0,75	0,6	0,222	0,778	0,378		
0,8	0,5	0,333	0,667	0,167	0,35	0,65	0,222	0,778	0,428	0,95	0,55	0,222	0,778	0,328		
0,95	0,5	0,222	0,778	0,278	0,4	0,6	0,222	0,778	0,378	1,1	0,45	0,222	0,778	0,228		
1,15	0,4	0,111	0,889	0,289	0,45	0,55	0,222	0,778	0,328	1,25	0,35	0,222	0,778	0,128		
1,5	0,35	0,111	0,889	0,239	0,55	0,5	0,111	0,889	0,389	1,35	0,35	0,111	0,889	0,239		
1,85	0,3	0,111	0,889	0,189	0,65	0,45	0,111	0,889	0,339	1,45	0,3	0,111	0,889	0,189		
2,05	0,2	0,111	0,889	0,089	0,75	0,4	0,111	0,889	0,289	1,55	0,25	0,111	0,889	0,139		
2,2	0,2	0	1	0,2	0,85	0,35	0,111	0,889	0,239	1,7	0,2	0,111	0,889	0,089		
2,6	0,2	0	1	0,15	1	0,3	0,111	0,889	0,189	1,9	0,2	0	1	0,2		
3,05	0,1	0	1	0,1	1,1	0,25	0,111	0,889	0,139	2,25	0,15	0	1	0,15		
3,3	0,1	0	1	0,05	1,2	0,25	0	1	0,25	2,9	0,1	0	1	0,1		
4,4	0	0	1	0	1,3	0,25	0	1	0,25	3,7	0,05	0	1	0,05		
						0,15	0	1	0,15	5,1	0	0	1	0		
						0,1	0	1	0,1							
						0,05	0	1	0,05							
						0	0	1	0							

1 = positiv für Läsion

Tabelle 25: Koordinaten der ROC-Kurve (Abbildung 53, Seite 72)

dorsal					Mitte					palmar				
IV ₁ Positiv, wenn	Sensitivität	1 - Spezifität	Spezifität	Youden-Index	IV ₁ Positiv, wenn	Sensitivität	1 - Spezifität	Spezifität	Youden-Index	IV ₁ Positiv, wenn	Sensitivität	1 - Spezifität	Spezifität	Youden-Index
2,2	1	1	0	0	-0,1	1	1	0	0	2,1	1	1	0	0
3,35	1	0,979	0,021	0,021	1,05	1	0,979	0,021	0,021	3,15	1	0,979	0,021	0,021
3,55	1	0,958	0,042	0,042	1,25	1	0,896	0,104	0,104	3,35	1	0,958	0,042	0,042
3,75	1	0,917	0,083	0,083	1,35	1	0,854	0,146	0,146	3,55	1	0,938	0,063	0,063
3,95	1	0,896	0,104	0,104	1,45	1	0,688	0,313	0,313	3,65	1	0,917	0,083	0,083
4,1	1	0,813	0,188	0,188	1,55	1	0,625	0,375	0,375	3,75	1	0,875	0,125	0,125
4,25	1	0,792	0,208	0,208	1,65	1	0,563	0,438	0,438	3,9	1	0,854	0,146	0,146
4,4	1	0,75	0,25	0,25	1,75	1	0,479	0,521	0,521	4,1	0,9	0,833	0,167	0,067
4,55	1	0,708	0,292	0,292	1,85	1	0,417	0,583	0,583	4,25	0,9	0,813	0,188	0,087
4,65	1	0,625	0,375	0,375	1,95	1	0,375	0,625	0,625	4,35	0,9	0,771	0,229	0,129
4,75	1	0,583	0,417	0,417	2,05	0,9	0,313	0,688	0,588	4,45	0,9	0,75	0,25	0,15
4,9	1	0,542	0,458	0,458	2,15	0,85	0,292	0,708	0,558	4,55	0,9	0,708	0,292	0,192
5,05	0,95	0,396	0,604	0,554	2,25	0,65	0,25	0,75	0,4	4,7	0,9	0,688	0,313	0,213
5,15	0,9	0,354	0,646	0,546	2,35	0,6	0,208	0,792	0,392	4,85	0,9	0,667	0,333	0,233
5,25	0,8	0,333	0,667	0,467	2,45	0,5	0,188	0,813	0,313	4,95	0,85	0,667	0,333	0,183
5,35	0,65	0,333	0,667	0,317	2,55	0,35	0,167	0,833	0,183	5,05	0,8	0,583	0,417	0,217
5,45	0,65	0,292	0,708	0,358	2,8	0,3	0,167	0,833	0,133	5,15	0,8	0,521	0,479	0,279
5,55	0,55	0,25	0,75	0,3	3,15	0,25	0,104	0,896	0,146	5,3	0,75	0,458	0,542	0,292
5,65	0,5	0,25	0,75	0,25	3,35	0,25	0,083	0,917	0,167	5,45	0,7	0,417	0,583	0,283
5,85	0,5	0,229	0,771	0,271	3,45	0,25	0,063	0,938	0,188	5,55	0,65	0,354	0,646	0,296
6,05	0,45	0,188	0,813	0,263	3,6	0,2	0,063	0,938	0,138	5,65	0,65	0,313	0,688	0,338
6,15	0,45	0,146	0,854	0,304	3,8	0,2	0,042	0,958	0,158	5,75	0,65	0,271	0,729	0,379
6,25	0,45	0,125	0,875	0,325	3,95	0,2	0,021	0,979	0,179	5,9	0,6	0,229	0,771	0,371
6,4	0,45	0,083	0,917	0,367	4,1	0,15	0	1	0,15	6,05	0,6	0,167	0,833	0,383
6,6	0,4	0,021	0,979	0,379	5,1	0,1	0	1	0,1	6,15	0,6	0,146	0,854	0,404
6,85	0,35	0	1	0,35	6,1	0,05	0	1	0,05	6,25	0,5	0,146	0,854	0,354
7,25	0,25	0	1	0,25	7,2	0	0	1	0	6,35	0,5	0,125	0,875	0,375
7,7	0,2	0	1	0,2						6,45	0,45	0,063	0,938	0,388
7,95	0,15	0	1	0,15						6,55	0,4	0,042	0,958	0,358
8,5	0,1	0	1	0,1						6,7	0,4	0,021	0,979	0,379
9,2	0,05	0	1	0,05						6,85	0,35	0,021	0,979	0,329
10,4	0	0	1	0						6,95	0,3	0,021	0,979	0,279
										7,4	0,15	0,021	0,979	0,129
										7,9	0,15	0	1	0,15
										8,2	0,1	0	1	0,1
										8,85	0,05	0	1	0,05
										10,3	0	0	1	0

1 = positiv für Läsion

Patienteninformation und Einwilligungserklärung



Berufsgenossenschaftliche Kliniken Bergmannstrost •
Postfach 20 01 53 • 06002 Halle (Saale)

**Klinik für Plastische und
Handchirurgie/
Brandverletzentenzentrum**
Direktor: Priv.-Doz. Dr. med. F. Siemers

Ihr Zeichen:
Ihre Nachricht vom:
Unser Zeichen:
Ansprechpartner:
Telefon: 0345/132-6333
Fax: 0345/132-6334
E-Mail: plastische-chirurgie@bergmannstrost.com
Datum:

Einwilligungserklärung zum Forschungsvorhaben

„Evaluierung des Stellenwertes der Sonographie zur Darstellung der intrinsischen karpalen
Bänder und des Triangulären fibrocartilaginären Complexes im Gesunden und bei
Verletzung“

Ich _____ wurde am _____
(Vor- und Zunahme, Geburtsdatum) (Datum)

durch _____ über Wesen und Tragweite des

Forschungsprojektes aufgeklärt.

Der genaue Inhalt und Ablauf des Verfahrens wurde mit mir besprochen und ich hatte Zeit
Fragen zu stellen.

Mit meiner Unterschrift bestätige ich, dass ich freiwillig und ohne Zwang an der Studie
teilnehme. Ich bin mit der Durchführung der diagnostischen Maßnahme „Sonographie“
einverstanden.

Ich weiß, dass ich jederzeit und ohne Angabe von Gründen mein Einverständnis zur
Teilnahme an dem Forschungsvorhaben widerrufen kann, ohne dass mir hieraus Nachteile
entstehen.

Über die Verwendung meiner persönlichen Daten wurde ich aufgeklärt. Ich bin
einverstanden, dass gesundheitsbezogene Daten von mir zu Forschungszwecken erhoben,
gespeichert und ausgewertet werden. Die Auswertung erfolgt pseudonymisiert. Eine Identifizierung
durch Dritte ist nicht möglich.

Halle (Saale), _____
Ort, Datum

Unterschrift Aufklärender

Unterschrift Patient

bergmannstrost
Verein für Berufsgenossenschaftliche
Heilbehandlung Halle e.V.
Geschäftsführer: Dr. H. Erhard
Vereinsregister VR 20850 (AG Stendal)

bergmannstrost
Merseburger Straße 165
06112 Halle (Saale)
IK- Nr.: 261 500 553
UST-Id-Nr.: DE 174 576 471

Internet: www.bergmannstrost.com

Chefarztsekretariat
Frau Ogdowski
Tel.: 0345 / 132-6333

Gutachtenauskunft
Tel.: 0345 / 132-6333

Ambulanzsekretariat/
D-Arztprechstunde
Tel.: 0345 / 132-6247

Brandverletzen-
zentrum
Zentraler Stützpunkt
Tel.: 0345 / 132-6312

Station PC 1
Zentraler Stützpunkt
Tel.: 0345 / 132-6383

Handfunktionslabor
Tel.: 0345 / 132-6249



Ihr Zeichen:
Ihre Nachricht vom:
Unser Zeichen:
Ansprechpartner:
Telefon: 0345/132-6333
Fax: 0345/132-6334
E-Mail: plastische-chirurgie@bergmannstrost.com
Datum:

Patienteninformation zur Studie

Studie:

„Evaluierung des Stellenwertes der Sonographie zur Darstellung der intrinsischen karpalen Bänder und des Triangulären fibrocartilaginären Complexes im Gesunden und bei Verletzung“

Verantwortlicher: PD Dr. med. habil. Frank Siemers

Warum wird die Studie durchgeführt?

Die Arthroskopie ist die Untersuchung der Wahl zur Diagnosestellung bei Verletzungen im Bereich der Handwurzel und des Handgelenkes. Technische Fortschritte bei den bildgebenden Verfahren lassen die Frage nach der Bedeutung als diagnostische Mittel aufkommen. Im Rahmen dieser Studie soll untersucht werden, welchen Stellenwert die Sonographie zukünftig als diagnostisches Verfahren bei Verletzungen im Bereich der Hand hat.

Wer kommt dafür in Frage?

Teilnehmen kann jeder, der 18 Jahre alt ist und bei dem ein Verdacht auf Verletzung der relevanten Strukturen besteht oder bei dem bereits eine Verletzung diagnostiziert wurde.

Chefarztsekretariat
Frau Ogdowski
Tel.: 0345 / 132-6333

Gutachtenauskunft
Tel.: 0345 / 132-6333

Ambulanzsekretariat/
D-Arztprechstunde
Tel.: 0345 / 132-6247

Brandverletzten-
zentrum
Zentraler Stützpunkt
Tel.: 0345 / 132-6312

Station PC 1
Zentraler Stützpunkt
Tel.: 0345 / 132-6383

Handfunktionslabor
Tel.: 0345 / 132-6249

Trägerverein
Verein für Berufsgenossenschaftliche
Heilbehandlung Halle e.V.
Geschäftsführer: Dr. H. Erhard
Vereinsregister VR 20850 (AG Stendal)

Adresse
Merseburger Straße 165
06112 Halle (Saale)
IK-Nr.: 261 500 553
UST-Id-Nr.: DE 174 576 471

Internet: www.bergmannstrost.com



Wie ist der Ablauf der Studie?

Bei Ihnen bestehen Beschwerden im Bereich des Handgelenkes. Entweder wurde bereits eine Verletzung des SL-Bandes (= Scapholunäres- Band ; Band zwischen den Handwurzelknochen Kahn- und Mondbein) und/oder des TFCC (= Triangulärer fibrocartilaginärer Complex; Zwischengelenkscheibe am Handgelenk) festgestellt oder es wird eine Verletzung vermutet.

Zur Abklärung der Verletzung wurden bzw. werden im Rahmen Ihrer normalen Behandlung verschiedene diagnostische Maßnahmen durchgeführt. Darunter zählen beispielsweise die Arthroskopie, MRT und Röntgenuntersuchungen. Zusätzlich soll nun im Rahmen der Studie eine Sonographieuntersuchung (Ultraschall) der Hand durchgeführt werden. Nach Auftragen eines Geles werden über einen Schallkopf Ultraschallwellen erzeugt, die von Strukturen der Hand reflektiert und wieder vom Ultraschallgerät erkannt werden. Dadurch entsteht ein Bild, das die Knochen, Bänder, Muskeln etc. darstellt. Anhand dieses Bildes soll geklärt werden, ob eine Verletzung der betreffenden Strukturen besteht. Nach heutigem Kenntnisstand ist die Sonographie ein sicheres und unschädliches Verfahren.

Weitere Untersuchungen mittels anderer Verfahren sind Teil Ihrer Behandlung und werden gesondert mit Ihnen besprochen.

Welche Risiken bestehen?

Die Ultraschalluntersuchung ist eine aus heutiger medizinischer Sicht vollkommen ungefährliche und unschädliche Untersuchung.

Gibt es eine Aufwandsentschädigung?

Nein, eine Aufwandsentschädigung bei Studienteilnahme erfolgt nicht.

Besteht eine zusätzliche Versicherung?

Nein, eine zusätzliche Versicherung besteht nicht.

Freiwilligkeit der Teilnahme

Die Teilnahme an der Studie ist freiwillig. Sie können jederzeit und ohne Angabe von Gründen Ihr Einverständnis widerrufen. Daraus ergeben sich für Sie keine Nachteile für die weitere medizinische Behandlung.

Was geschieht mit den persönlichen Daten?

Ihre Daten werden auf einem pseudonymisierten Befundbogen dokumentiert. Dieser enthält nicht Ihren Namen, sondern eine Nummer. Anhand einer Liste, die getrennt und nur für autorisierte Personen zugänglich aufbewahrt wird, kann diese Nummer ihrem Namen zugeordnet werden.

Mit den Daten auf dem Befundbogen sowie den Ergebnissen der Untersuchungen erfolgt dann die Auswertung im Rahmen der Studie.

Bei einem Widerruf Ihrer Einwilligung haben Sie das Recht, die Löschung der erhobenen Daten zu verlangen. Hieraus ergibt sich kein Nachteil für Sie.

Ethikvotum



MARTIN-LUTHER-UNIVERSITÄT
HALLE-WITTENBERG

Medizinische Fakultät
Ethik-Kommission

Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 06097 Halle (Saale)

Herrn PD Dr. F. Siemers
Klinik für Plastische und Handchirurgie
und Brandverletzenzentrum
Berufsgenossenschaftliche Kliniken
Bergmannstrost
Postfach 20 01 53
06002 Halle

Ihre Zeichen

Ihr Schreiben vom

Unsere Zeichen
hm-bü

Datum
12.11.2014

Postanschrift:
06097 Halle (Saale)

Hausanschrift:
Magdeburger Straße 16
06112 Halle (Saale)

Geschäftsstelle:
Tel 0345 557-4476
Fax 0345 557-4477
E-Mail ethik-kommission@uk-halle.de
Internet: www.medizin.uni-halle.de/

Bearbeitungs-Nummer: 2014-17

Titel der Studie: Evaluierung des Stellenwertes der Sonographie zur Darstellung der intrinsischen karpalen Bänder und des Trifibrocartilaginären Complexes im Gesunden und bei Verletzungen

Sehr geehrter Herr Dr. Siemers,

mit Schreiben vom 05.11.2014 zur oben genannten Studie haben Sie folgende Unterlagen übersandt:


- Patienteninformation (ohne Datum),
- Einwilligungserklärung (ohne Datum),
- geändertes Studienprotokoll.

Bankverbindung:
Deutsche Bundesbank,
Filiale Magdeburg
IBAN:
DE3781000000080001530
BIC:
MARKDEF1810

Steuernummer: 111/144/02550
(Finanzamt Halle-Nord)

Die Auflagen des Votums der Ethik-Kommission vom 25.03.2014 sind erfüllt. Ich kann Ihnen bestätigen, dass seitens der Kommission keine ethischen Bedenken gegen die Durchführung der Studie bestehen.

Mit freundlichen Grüßen


Prof. Dr. med. Hermann M. Behre
Vorsitzender der Ethik-Kommission

Die Ethik-Kommission der Medizinischen Fakultät der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg arbeitet auf der Grundlage deutschen Rechts sowie in Anlehnung an die ICH-GCP-Richtlinien.

Die Ethik-Kommission weist darauf hin, dass die ärztliche und juristische Verantwortung für die Durchführung des Vorhabens unabhängig vom Beratungsergebnis bei den durchführenden Ärzten und Wissenschaftlern verbleibt.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Klassifikation der carpalen Instabilität nach Larsen (modifiziert aus Frank et al. 2015)	15
Tabelle 2: Mayo-Klassifikation der carpalen Instabilität (modifiziert aus Frank et al. 2015)	16
Tabelle 3: Arthroskopische Klassifikation der scapholunären Bandläsion nach Geissler (modifiziert nach Geissler et al. 1996)	18
Tabelle 4: Arthroskopische EWAS Klassifikation der scapholunären Bandverletzung (aus Frank et al. 2015)	18
Tabelle 5: Ein- und Ausschlusskriterien Gruppe 1	34
Tabelle 6: Ein- und Ausschlusskriterien Gruppe 2	34
Tabelle 7: Ein- und Ausschlusskriterien Gruppe 3	35
Tabelle 8: Übergeordnete Gruppeneinteilung	52
Tabelle 9: Kategorisierung von Cohens-Kappa Werten (nach Altman 1999, Kwiecien et al. 2011)	53
Tabelle 10 Test der Differenz der Messwerte der Sonographie auf Normalverteilung	55
Tabelle 11: Punkteverteilung für den Score zur Beurteilung des SL-Bandes	56
Tabelle 12: Kreuztabelle Darstellbarkeit SL-Band in Sonographie und MRT dorsal	60
Tabelle 13: Kreuztabelle Darstellbarkeit SL-Band in Sonographie und MRT dorsal	60
Tabelle 14: Kreuztabelle Darstellbarkeit SL-Band in Sonographie betroffene Seite und Gegenseite dorsal bei „intaktem“ SL-Band und „Läsion“	61
Tabelle 15: Kreuztabelle Darstellbarkeit SL-Band in Sonographie betroffene Seite und Gegenseite palmar bei „intaktem“ SL-Band und „Läsion“	62
Tabelle 16: SL-Abstände in MRT und Sonographie sowie Differenz beider Hände jeweils bei „Läsion“ und „intaktem“ SL-Band	62
Tabelle 17: Intra-Class-Korrelationskoeffizient für Interrater-Reliabilität von Sonographie und MRT	63
Tabelle 18: Test auf Unterschied und Übereinstimmung für SL-Abstand in der Sonographie der betroffenen Seite und Gegenseite bei intaktem SL-Band .	66

Tabelle 19: T-Test/Wilcoxon-Test für SL-Abstand in der Sonographie der betroffenen Seite und Gegenseite bei defektem SL-Band	68
Tabelle 20: AUC für die ROC-Kurve (Abbildung 53)	72
Tabelle 21: AUC für die ROC-Kurve (Abbildung 54)	73
Tabelle 22: Cut-off-Werte mit entsprechender Sensitivität und Spezifität	74
Tabelle 23: Koordinaten der ROC-Kurve (Abbildung 55) und Youden-Index	76
Tabelle 24: Koordinaten der ROC-Kurve (Abbildung 54, Seite 73)	IV
Tabelle 25: Koordinaten der ROC-Kurve (Abbildung 53, Seite 72)	V

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ansicht auf die distalen Gelenkflächen von Radius und Ulna eines rechten Unterarms (modifiziert aus Schünke et al. 2007).....	4
Abbildung 2: Ausschnitt Knochen der rechten Hand mit Fokus auf den Handwurzelknochen, a) von palmar b) von dorsal (modifiziert aus Schünke et al. 2007)	5
Abbildung 3: Neigungswinkel der Gelenkflächen am distalen Radius (aus Schünke et al. 2007)	5
Abbildung 4: Schematische Darstellung der Gelenkkompartimente - rechte Hand in der Ansicht von dorsal (modifiziert aus Schünke et al. 2007)	6
Abbildung 5: Interossäre Bänder an den proximalen Handwurzelknochen: ...	7
Abbildung 6: Säulenmodell der Hand, Ansicht von dorsal (aus Schünke et al. 2007).....	8
Abbildung 7: Darstellung der Stabilitätskonzepte der Handwurzel (modifiziert aus Schmidt 2003)	9
Abbildung 8: Bewegungstendenzen der Carpalknochen bei carpaler Instabilität (aus Megerle und Machens 2015).....	9
Abbildung 9: Architektur der Mittelhand (aus Schünke et al. 2007).....	10
Abbildung 10: SLAC-Wrist nach Watson: Stadieneinteilung; Reihenfolge der Arthroseentstehung: II,I,III (modifiziert aus Towfigh et al. 2011)	14
Abbildung 11: Stadien der SLD: a) Grad I, b) Grad II, c) Grad III (aus Towfigh et al. 2011)	17
Abbildung 12: Scaphoid-Shift-Test nach Watson (aus Towfigh et al. 2011). 20	
Abbildung 13: Schemata zur Projektionsradiographie des Handgelenks in Neutralstellung (aus Towfigh et al. 2011).....	21
Abbildung 14: Konzentrische Bögen nach Gilula (aus Towfigh et al. 2011). 22	
Abbildung 15: Bestimmung des scapholunären Winkels. Physiologische und pathologische Stellung des Os lunatum (modifiziert aus Hoffmann 2009, Towfigh et al. 2011).....	23
Abbildung 16: Algorithmus der Therapie der scapholunären Bandläsion; HG Handgelenk, KG Krankengymnastik, PCR proximal row carpectomie, TA	

Teilarthrodese, STT Gelenk zwischen Scaphoid, Trapezium und Trapezoideum (modifiziert aus Prommersberger et al. 2014)	27
Abbildung 17: Alters- und Geschlechterverteilung aller Studienteilnehmer ..	33
Abbildung 18: Ursachen der Schallabschwächung (modifiziert aus Reiser et al. 2011)	36
Abbildung 19: Funktionsweise der Sonographie (modifiziert aus Reiser et al. 2011)	37
Abbildung 20: Schallkopffarten (modifiziert aus Reiser et al. 2011)	38
Abbildung 21: Zur Untersuchung verwendetes Ultraschallgerät	38
Abbildung 22: 5-17 MHz Linearschallkopf für die Untersuchung	39
Abbildung 23: a) Positionierung Hand und Schallkopf dorsal in Neutralstellung	41
Abbildung 24: Positionierung Hand und Schallkopf palmar	41
Abbildung 25: Hand rechts dorsal, SL-Band mit Pfeilen markiert	42
Abbildung 26: Hand rechts dorsal, SL-Band nicht darstellbar	43
Abbildung 27: Diskontinuierliches SL-Band mit Bandresten bei nachgewiesener Ruptur	43
Abbildung 28: sonographische SL-Spaltmessung dorsal mittels PACS-Programm	44
Abbildung 29: a) coronales T1 TSE und b) transversales T2 FFE gewichtetes Bild vom Handgelenk mit SL-Bandruptur	46
Abbildung 30: Patientenlagerung im Kernspintomograph (aus Lützkendorf 2009)	46
Abbildung 31: a) MRT T2 Sequenz, transversal, intaktes SL-Band (mit Pfeilen markiert), b) MRT T2 Sequenz, transversal, Partialruptur SL-Band palmar (Pfeil)	47
Abbildung 32: a) Untersuchungsgang radiocarpal über das 3-4-Portal b) mit Austasten des SL-Bandes c) Sicht auf den SL-Spalt mediocarpal vom MCR-Portal (modifiziert aus Vogt 2011)	48
Abbildung 33: SL-Bandverletzung mit ossärer Abscherung des SL-Bandes vom Os lunatum (aus Vogt 2011)	49

Abbildung 34: Schematische Darstellung einer Röntgenröhre (modifiziert aus Reiser et al. 2011).....	50
Abbildung 35: a) Röntgenbild der linken Hand im Seitbild, Bestimmung des SL-Winkels – DISI-Fehlstellung b) SL-Dissoziation in d.p. Röntgenfunktionsaufnahmen bei SL-Bandruptur	51
Abbildung 36: beispielhafte Darstellungen eines intakten SL-Bands dorsal im Ultraschall bei mehreren Patienten	57
Abbildung 37: beispielhafte Darstellungen eines intakten SL-Bands palmar im Ultraschall bei zwei Patienten	57
Abbildung 38: Darstellung SL-Band bei „Intakten“ in der Sonographie	58
Abbildung 39: Darstellung SL-Band bei "Läsion" in der Sonographie	58
Abbildung 40: Darstellung SL-Band bei "Kompletttraktur" in der Sonographie	59
Abbildung 41: Bland-Altman-Plot von MRT und Sonographie dorsal	64
Abbildung 42: Bland-Altman-Plot von MRT und Sonographie Mitte	64
Abbildung 43: Bland-Altman-Plot von MRT und Sonographie palmar	65
Abbildung 44: Scapholunärer Abstand in der Sonographie der betroffenen Seite und Gegenseite bei intaktem SL-Band	66
Abbildung 45: Bland-Altman-Plot der Abstände (dorsal, Mitte, palmar) der Sonographie von rechter und linker Hand bei intaktem SL-Band.....	67
Abbildung 46: Scapholunärer Abstand in der Sonographie der betroffenen Seite und Gegenseite bei defektem SL-Band	67
Abbildung 47: Bland-Altman-Plot der Abstände (dorsal, Mitte, palmar) in der Sonographie von betroffener und Gegenseite bei defektem SL-Band	68
Abbildung 48: SL-Abstand in der Sonographie bei Komplett- und Teilruptur	69
Abbildung 49: Mittelwertabstand aller Messpunkte (dorsal, Mitte, palmar) je Patient für die Funktionsaufnahmen in der Sonographie	70
Abbildung 50: Mittelwertabstand der einzelnen Messpunkte für die Funktionsaufnahmen in der Sonographie aller Patienten.....	70
Abbildung 51: Unterschied der Differenzen der Funktionsaufnahmen von betroffener Seite und Gegenseite für Diagnose „Läsion“	71

Abbildung 52: Unterschied der Differenzen der Funktionsaufnahmen von betroffener Seite und Gegenseite für Diagnose „intakt“	71
Abbildung 53: ROC-Kurve für die nativen SL-Abstände in der Sonographie	72
Abbildung 54: ROC-Kurve für die Differenz der SL-Abstände von betroffener Seite und Gegenseite in der Sonographie	73
Abbildung 55: ROC-Kurve für den Score	75
Abbildung 56: Schematische Darstellung abweichender Abstände durch unterschiedliche Schnittebenen in der Ansicht von transversal	92
Abbildung 57: Schematische Darstellung abweichender Abstände durch unterschiedliche Knochendrehung in der Ansicht von coronal	93

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen danken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben.

Zunächst möchte ich Herrn Prof. Dr. med. Dr. rer. nat. Gunther O. Hofmann für die Möglichkeit der Promotion danken.

Ein ganz besonderer Dank geht an Herrn Prof. Dr. med. Frank Siemers für die Überlassung des Promotionsthemas, die fachliche Unterstützung, die Möglichkeit der Patientenrekrutierung über die Klinik für Plastische und Handchirurgie im BG Klinikum Bergmannstrost sowie für die sehr gute Betreuung.

In diesem Zusammenhang danke ich auch Herrn Georgios Tamouridis, welcher sich sehr für die Patientenrekrutierung eingesetzt hat und allzeit als Ansprechpartner zur Verfügung stand.

Ein allgemeines Dankeschön geht an die Mitarbeiter des BG Klinikums Bergmannstrost Halle, welche die Durchführung der Studie ermöglicht haben.

Weiterhin möchte ich recht herzlich Herrn Dipl. Sportwiss. Philipp Schenk für die freundliche und exzellente Beratung in Sachen Statistik danken.

Zum Schluss möchte ich mich von ganzem Herzen bei meiner Familie, meinen Eltern und meiner Freundin bedanken. Ohne die moralische Unterstützung, Geduld, Motivation und konstruktive Kritik wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass mir die Promotionsordnung der Medizinischen Fakultät der Friedrich-Schiller-Universität bekannt ist,

ich die Dissertation selbst angefertigt habe und alle von mir benutzten Hilfsmittel, persönlichen Mitteilungen und Quellen in meiner Arbeit angegeben sind,

mich folgende Personen bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts unterstützt haben: Prof. Dr. med. Frank Siemers

die Hilfe eines Promotionsberaters nicht in Anspruch genommen wurde und dass Dritte weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen von mir für Arbeiten erhalten haben, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen,

dass ich die Dissertation noch nicht als Prüfungsarbeit für eine staatliche oder andere wissenschaftliche Prüfung eingereicht habe und

dass ich die gleiche, eine in wesentlichen Teilen ähnliche oder eine andere Abhandlung nicht bei einer anderen Hochschule als Dissertation eingereicht habe.

Halle (Saale), den 07.12.2018

Tino Handschak